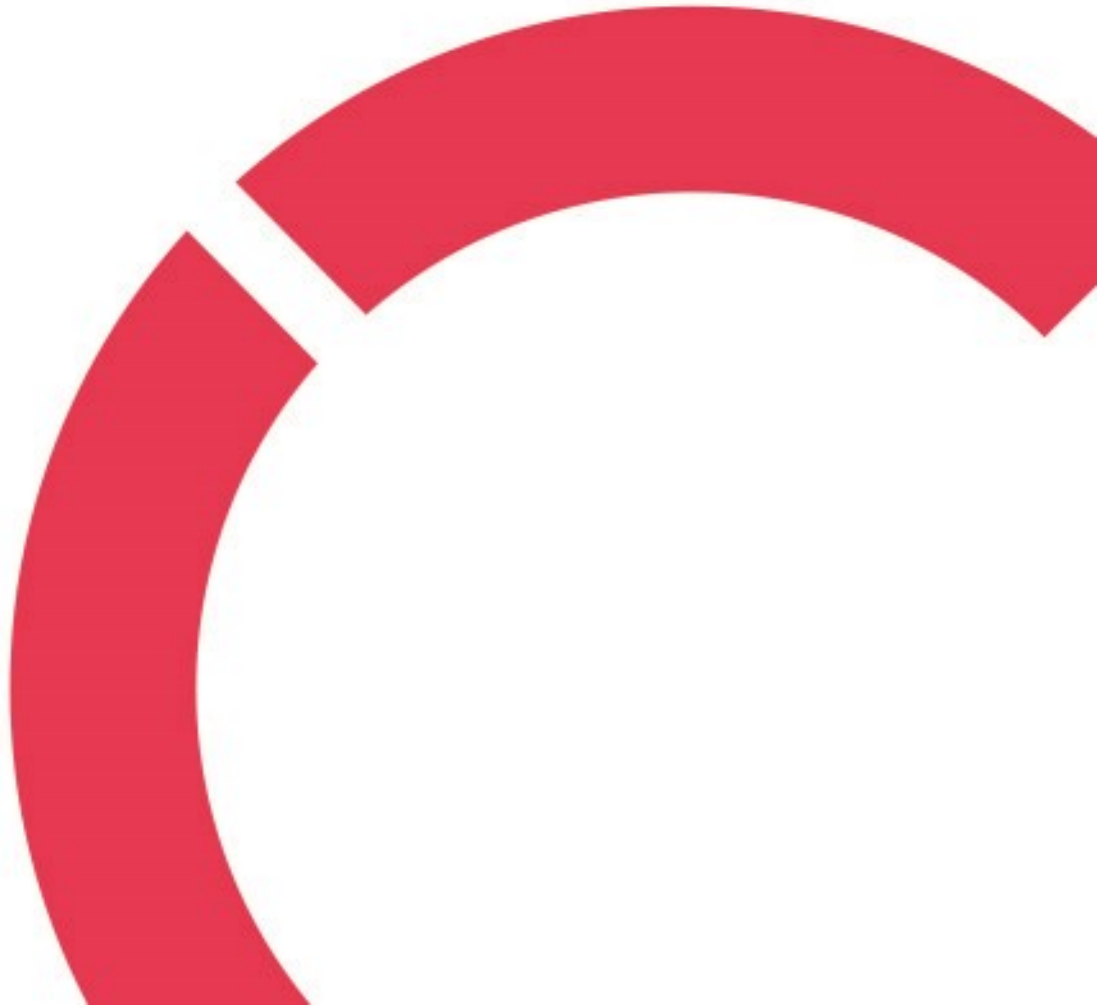


**Carolina Ahlskog**

# **SEOSAINNEET TERÄKSEN VALMISTUKSESSA**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Kemiantekniikan koulutus  
Toukokuu 2023**



**TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ**

<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Toukokuu 2023	<b>Tekijä/tekijät</b> Carolina Ahlskog
<b>Koulutus</b> Prosessi- ja materiaalitekniikka, Kemianteekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK  <input type="checkbox"/> YAMK
<b>Työn nimi</b> SEOSAINEET TERÄKSEN VALMISTUKSESSA		
<b>Työn ohjaaja</b> Harri Kosonen		<b>Sivumäärä</b> 41
<b>Työelämäohjaaja</b>		
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää teräksen valmistuksessa käytettävien seosaineiden merkitystä. Tavoitteena opinnäytetyössä oli antaa kokonaiskuva seosaineista, niiden käytöstä ja vaikutuksesta teräksen ominaisuuksiin.</p> <p>Teräs on moninainen materiaali ja teräslajeja on olemassa tuhansia. Seosaineilla teräksen valmistuksen yhteydessä on vaikutus teräksen ominaisuuksiin joko suoraan tai muuttamalla sen mikrorakennetta. Käytetyistä seosaineista hiili on tärkein teräksen valmistuksessa, koska sillä on eniten vaikutusta teräksen lopullisiin ominaisuuksiin ja mikrorakenteeseen.</p> <p>Kyseessä on teoreettinen opinnäytetyö ja siinä esiteltiin seosaineille keskeisintä teoriaa teräksestä, teräksen rakenteesta, teräksen valmistuksesta, materiaalien ominaisuuksista sekä teräksen standardoinnista. Seosaineista esiteltiin yleisimmät aineet teräksen valmistuksessa.</p>		
<b>Asiasanat</b> Materiaalin ominaisuudet, materiaalitekniikka, seosaineet, teräs		

**ABSTRACT**

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> May 2023	<b>Author</b> Carolina Ahlskog
<b>Degree programme</b> Chemical Engineering		
<b>Name of thesis</b> ALLOYING ELEMENTS IN STEEL PRODUCTION		
<b>Centria supervisor</b> Harri Kosonen		<b>Pages</b> 41
<b>Instructor representing commissioning institution or company</b>		
<p>The purpose of the thesis was to clarify the relevance of alloying materials used in the production of steel. The objective of the thesis was to give an overall picture of alloying elements, their usage, and their influence on the properties of steel.</p> <p>Steel is a diverse material and there are thousands of different steel types. The alloying elements used in steel production influence either directly the characteristics of steel or by changing its microstructure. Carbon is the most important alloying element used in steel production due to its great influence in the characteristics of steel and its microstructure.</p> <p>The thesis composition is entirely theoretical, and it includes most significant theory in the context of alloying elements: steel, steel structure, steel production, material properties and steel standardization. The alloying elements included are most common in steel production.</p>		

<p><b>Key words</b> Material properties, material technology, alloying elements, steel</p>
--

TIIVISTELMÄ  
ABSTRACT  
SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	1
2 TERÄS .....	2
2.1 Teräksen rakenne .....	3
2.2 Teräksen valmistus .....	6
2.2.1 Raudan ja malmipohjaisen teräksen valmistus .....	7
2.2.2 Teräksen valmistus kierrätysteräksestä .....	9
2.2.3 Fossiilivapaan teräksen valmistus .....	9
2.2.4 Sulan jatkokäsittely ja seosaineiden seostus .....	10
3 TERÄKSEN OMINAISUUKSIA .....	12
3.1 Lujuus ja jännitys .....	12
3.2 Kovuus .....	14
3.3 Sitkeys .....	15
3.4 Kimmoisuus .....	15
3.5 Korroosionkestävyys .....	16
3.6 Muovattavuus ja muokattavuus .....	19
3.7 Lämpökäsiteltävyys .....	19
3.8 Lastuttavuus .....	19
3.9 Hitsattavuus .....	20
4 TERÄKSEN VALMISTUKSEN YLEISIMMÄT SEOSAINHEET .....	21
4.1 Hiili .....	22
4.1.1 Ferriitti .....	24
4.1.2 Perliitti .....	25
4.1.3 Martensiitti .....	26
4.1.4 Austeniitti .....	27
4.2 Pii .....	28
4.3 Mangaani .....	29
4.4 Alumiini .....	30
4.5 Kromi .....	30
4.6 Kupari .....	31
4.7 Nikkeli .....	31
4.8 Molybdeeni .....	32
4.9 Boori .....	32
4.10 Volframi .....	32
4.11 Koboltti .....	33
4.12 Niobi .....	33
4.13 Vanadiini .....	33
4.14 Titaani .....	34
4.15 Rikki .....	34
4.16 Fosfori .....	35
4.17 Typpi .....	35
4.18 Happi .....	35
5 TERÄKSEN STANDARDINTI .....	36

<b>6 YHTEENVETO .....</b>	<b>38</b>
---------------------------	-----------

<b>LÄHTEET .....</b>	<b>39</b>
----------------------	-----------

## **KUVAT**

KUVA 1. Kiteiden kasvu ja raerajat .....	4
KUVA 2. Hilamuodot .....	5
KUVA 3. Kiteen atomien sekoittuminen hilassa .....	5
KUVA 4. Masuuni .....	8
KUVA 5. Valokaariuuni .....	9
KUVA 6. Langan syöttö .....	11
KUVA 7. Sisäinen ja ulkoinen jännitys .....	13
KUVA 8. Jännitystapauksia .....	13
KUVA 9. Kovuus .....	14
KUVA 10. Sitkeä ja hauras aine taivutuksessa .....	15
KUVA 11. Kimmoisuus .....	16
KUVA 12. Metallien sähkökemiallinen jännitesarja merivedessä (25 °C) .....	17
KUVA 13. Korroosio tyyppejä .....	18
KUVA 14. Lastuavaa työstöä .....	20
KUVA 15. Rauta-hiili-tasapainospiirros .....	24
KUVA 16. Ferriittiä .....	25
KUVA 17. Täysin perliittinen rakenne (hiiltä 0,8 %) .....	26
KUVA 18. Martensiittia .....	27
KUVA 19. Austeniittia .....	28
KUVA 20. Ainestandardoinnin järjestelmä .....	36
KUVA 21. Standardeja .....	37

## **TAULUKOT**

TAULUKKO 1. Seosaineiden vaikutus teräksen ominaisuuksiin .....	22
---	----

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aihe syntyi keväällä 2023 opiskelijan omasta mielenkiinnosta aiheeseen. Työn tarkoituksena on selvittää teräksen valmistuksessa käytettävien seosaineiden merkitystä. Opinnäytetyössä esitetään yleistä teoriaa teräksestä, teräksen rakenteesta, teräksen valmistuksesta, teräksen ominaisuuksista sekä teräksen standardoinnista. Sen lisäksi esitellään yleisimmät teräksen valmistuksessa käytettävät seosaineet.

Keskeisenä tavoitteena opinnäytetyössä on antaa kokonaiskuva seosaineista, niiden käytöstä ja siitä, miten ne vaikuttavat teräksen ominaisuuksiin. Puhtaalla raudalla ei ole juurikaan teknistä käyttöä, mutta seostettuna hiileen siitä saadaan valmistettua terästä. Teräs sisältää raudan ja hiilen lisäksi myös muita seosaineita, joiden avulla teräksistä saadaan hyvin moninaisia materiaaleja. Teräslajeja on olemassa tuhansia niiden poikkeavien koostumuksien sekä lämpökäsittelyiden seurauksena. Teräksen koostumuksen ja ominaisuuksien ymmärtäminen on tärkeää käyttäjälle, jotta pystytään valitsemaan käyttötarkoitukseen ja -kohteeseen soveltuva materiaali.

Opinnäytetyön tekstin pohjana käytetään laajasti lähdekirjallisuutta koskien teräksen valmistusta ja materiaalitekniikkaa. Merkittävämpiä lähteitä ovat Materiaalitekniikka (Ansaharju, Ilomäki, Katainen, Maaranen & Mäkinen 1989), Materiaalitekniikka (Sorsa 2015) ja Teräskirja (Metallinjalostajat 2014), joihin suurin osa tekstistä pohjautuu. Niiden lisäksi lähteinä on hyödynnetty paljon alan yritysten ja yhdistysten sivuilta saatua tietoa.

## 2 TERÄS

Raudalla on merkittävä rooli raaka-aineena yhteiskunnalle. Yhdessä seoksineen rauta on ylivoimaisesti eniten käytetty metalli. Käytön suosioon vaikuttaneita tekijöitä ovat muun muassa raudan yleinen saatavuus, rautametallien helppo valmistaminen ja niiden moninaisuus. Rautametalleja pystytään monilla eri tavoilla käsittelemään, joten niistä saadaan materiaaleja hyvin monenlaisiin käyttötarkoituksiin ja -kohteisiin. Rauta on myös taloudellisesta näkökulmasta katsottuna edullista verrattaessa muihin metalleihin. (Ansaharju, Ilomäki, Katainen, Maaranen & Mäkinen 1989, 17.)

Rautaa esiintyy maankuoressa noin 5 %, mikä tekee siitä maankuoren toiseksi yleisimmän metallin. Maankuoressa se on erilaisien yhdisteiden muodossa, mutta rautaa esiintyy kuitenkin myös jonkin verran vapaana luonnossa meteoriittiraudan muodossa. Sen esiintyvyys maankuoressa on kuitenkin huomattavasti suurempi. Tärkeitä louhittavia mineraaleja, jotka sisältävät rautayhdisteitä, ovat rautaoksidit ja rautasulfidi ( $\text{FeS}_2$ ). Yleisiä rautaoksideja ovat magnetiitti ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ja hematitiitti ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Niiden lisäksi myös rautasälpää eli rautakarbonaattia ( $\text{FeCO}_3$ ) louhitaan jonkin verran. Rautaa esiintyy myös runsaasti silikaattimineraaleina, mutta niillä ei ole merkitystä malmina. (Sorsa 2015, 28.)

Rautametallit luokitellaan niiden sisältämän hiilen mukaan kolmeen ryhmään eli rautoihin, teräksiin ja valurautoihin. Raudoissa hiilipitoisuus on alle 0,05 %, teräksissä 0,05–1,7 % ja valuraudoissa yli 1,7 %. Teräs on kaikista rautametalleista eniten käytetty. (Ansaharju ym. 1989, 17.)

Teräs on raudan ja hiilen seos, joka sisältää myös muita seosaineita (Terästä ja rautaa). Seostamisen ja muiden käsittelyiden avulla teräksistä saadaan hyvin moninaisia materiaaleja (Ansaharju ym. 1989, 17). Teräslajeja on olemassa useita tuhansia, niistä suurin osa on kehitetty viimeisen 20–30 vuoden aikana (Teräs materiaalina; Terästä ja rautaa). Teräslajit voidaan luokitella monella eri tavalla, mutta yleisin on käyttötarkoituksen mukainen luokittelu, esimerkiksi yleisiin rakenneteräksiin ja ruostumattomiin teräksiin (Metallinjalostajat 2014, 8; Terästä ja rautaa).

Teräs on moninainen materiaali, minkä vuoksi sillä on monenlaisia käyttötarkoituksia ja -kohteita. Terästä käsitellään eri tavoin sen valmistuksen yhteydessä, jotta se soveltuu kuhunkin tarkoitukseen. Seostamisella valmistuksen yhteydessä on tärkeä merkitys teräksen käsittelyille ja lopullisille ominaisuuksille. Seostuksessa säädellään teräksen sisältämiä seosaineita ja niiden pitoisuuksia. Hiilellä on

merkittävä vaikutus teräksen ominaisuuksiin ja siksi teräkset voidaan luokitella hiilipitoisuuden mukaan (Terästä ja rautaa). Teräkset voidaan myös yleisesti luokitella niiden koostumuksen mukaan. Tällöin puhutaan seostamattomista teräksistä ja seostetuista teräksistä. Seostamattomat teräkset jaetaan kolmeen ryhmään niiden hiilipitoisuuden mukaan: niukkahiiliset (0,05–0,25 %), keskihiiliset (0,25–0,60 %) ja runsashiiliset (0,60–1,7 %). Seostetut teräkset jaetaan kahteen ryhmään niiden seosainepitoisuuden mukaan: niukkaseosteiset (alle 5 %) ja runsasseosteiset (yli 5 %). (Ansaharju ym. 1989, 32.)

Teräs on moninainen rautametalli ja eri teräslajeilla on hyvin erilaisia ominaisuuksia. Yleisesti eri teräslajien yhteisiin ominaisuuksiin lukeutuvat niiden lujuus ja muokattavuus eri lämpötiloissa. Teräslajien muihin hyviin ominaisuuksiin lukeutuvat muun muassa niiden karkaistavuus, sitkeys, kimmoisuus, lastuttavuus, korroosionkestävyys tai hitsattavuus. Yhdellä teräslajilla ei pysty olemaan kaikkia teräksen hyviä ominaisuuksia. (Ansaharju ym. 1989, 17–18.)

Kaikesta teräksestä noin 30 % menee rakenneteollisuuteen, jossa sitä käytetään monenlaisina rakenteina (Teräs). Teräksen suuri lujuus erottaa sen muista rakennusaineista, kuten tiilestä, betonista ja puusta. Rakennusmateriaalina teräksen etuja ovat muun muassa sen pitkäaikainen kestävyys, ominaisuuksien säädettävyys, uudelleen käytettävyys ja kierrätettävyys. (Teräs materiaalina.) Teräksen käyttökohteita voidaan myös tarkastella niiden hiilipitoisuuden mukaan. Niukkahiilisiä teräksiä käytetään erilaisiin levyihin, putkiin, lankoihin ja ruuveihin. Keskihiilisiä käytetään muun muassa akseleihin, ratakiskoihin ja jousien lankoihin. Runsashiilisiä taas käytetään erilaisiin muotteihin, työkaluihin ja veitsiin. (Ansaharju ym. 1989, 33.)

## 2.1 Teräksen rakenne

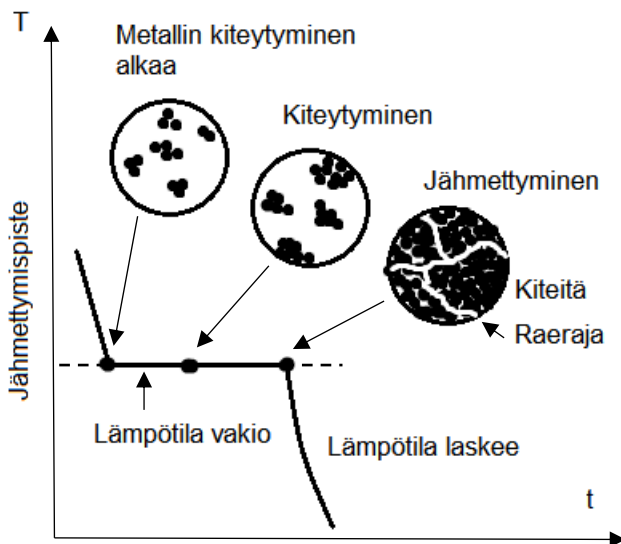
Metallit esiintyvät kiinteässä olomuodossa huoneenlämpötilassa. Kiinteitä metalleja pitää koossa niiden atomien välinen metallisidos. Ominaisiin tuntomerkkeihin metalleilla kuuluvat niiden hyvä sähkön- ja lämmönjohtavuus. Nämä ominaisuudet perustuvat niin sanottujen vapaiden elektronien liikkeeseen. Vapaat elektronit estävät fotonien kulkemisen metallihilan läpi antaen metalleille myös niiden ominaisen kiillon. (Ansaharju ym. 1989, 13; Sorsa 2015, 58.)

Yleisesti puhuttaessa aine voi olla amorfista tai kiteistä. Metallit ovat kiteisiä eli niiden atomit järjestyvät aina samaan järjestykseen metallisulan jäähmettyessä. Järjestäytyminen jatkuu, kunnes toinen



kasvava kide tulee vastaan. Kiteiden muoto ja koko voivat vaihdella eri olosuhteissa. Jähmettyneen aineen kiteitä kutsutaan myös rakeiksi. Amorfisen aineen, kuten lasin, ollessa kiinteässä olomuodossa aineen sisäinen rakenne muistuttaa enemmän nestettä. (Ansaharju ym. 1989, 13.)

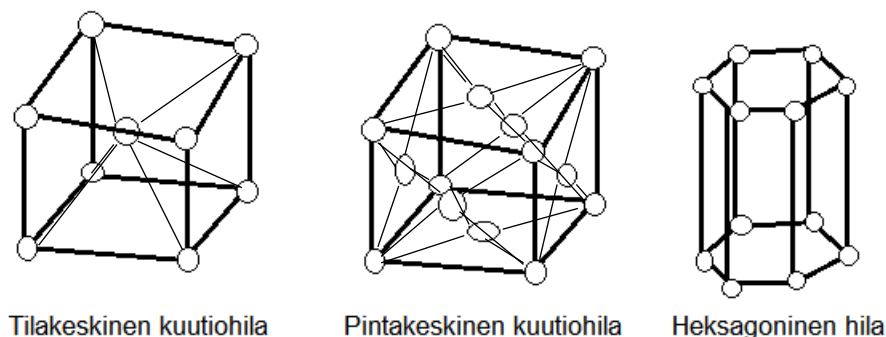
Metallisulan jähmettyemisessä syntyvä kiderakenne ei ole yhtenäinen teräskappaleen läpi. Vastaan tulleiden kiteiden yhtymäkohtia nimitetään raerajoiksi. Atomit eivät pidä yhtä lujasti kiinni toisistaan raerajoilla kuin kiteen sisällä. (Ansaharju ym. 1989, 13.) Kiderakenne jakautuu pienempiin osiin, jotka erottaa raeraja yksityisiin rakeisiin. Rakeiden koolla ja muodolla on suuri vaikutus teräksen ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, sitkeyteen ja korroosionkestävyyteen. Teräksen kiteytymistä voidaan ohjailta seosaineilla ja käsittelyillä teräksen valmistuksen yhteydessä, millä saavutetaan halutut ominaisuudet teräkselle (Metallinjalostajat 2014, 5; Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 35). Kuvassa 1 on havainnollistettuna kiderakenteen muodostumista.



KUVA 1. Kiteiden kasvu ja raerajat (mukaiillen Ansaharju ym. 1989, 13)

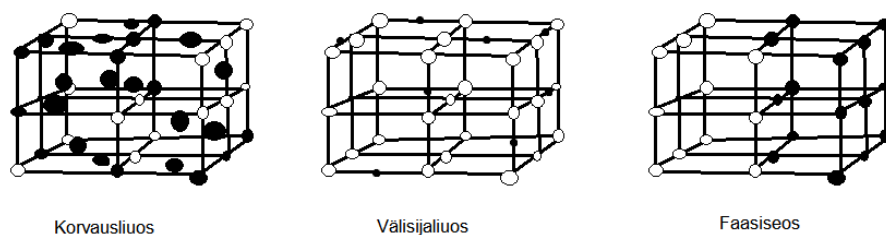
Kiteen atomien perusjärjestystä kutsutaan hilaksi. Kiteen kaikki atomit noudattavat tämän hilan järjestystä ja suuntaa kiteen kasvaessa. Metalleilla hiloja esiintyy kolmea eri tyyppiä: tilakeskeinen kuutiohila, pintakeskeinen kuutiohila ja heksagoninen hila. (Ansaharju ym. 1989, 14.) Raudalla kuitenkin esiintyy vain kahta eri kidemuotoa, pintakeskeinen ja tilakeskeinen kuutiohila. Pintakeskisessä hilassa rauta-atomit sijoittuvat kuution kulmien lisäksi kuution sivutahkojen keskipisteisiin. Sen sijaan tilakes-

kisessä hilassa rauta-atomit sijoittuvat kuution keskelle. Pintakeskistä rakennetta kutsutaan austeniitiksi ja tilakeskistä ferriitiksi. (Metallinjalostajat 2014, 4.) Kuvassa 2 on havainnollistettu eri hilamuodot.



KUVA 2. Hilamuodot (mukaiillen Ansaharju ym. 1989, 14)

Kun teräksen valmistuksessa perusaineisiin sekoitetaan muita aineita, ovat ne toisiinsa nähden eri tavoin järjestäytyneitä. Aineessa voi olla yhdenlaisia tai monenlaisia kidelaatuja eli faaseja. Jos aineiden atomit ovat sekoittuneet jokaisessa kiteessä samalla tavoin on kyseessä jähmeä liuos. Korvausliuoksissa tietyn aineen atomi korvaa tietyssä järjestyksessä toisen aineen atomin paikan. Välisijaliuoksissa toisen aineen atomit voivat olla tasaisesti jakautuneena toisen aineen atomien lomiin. Kuvassa 3 on havainnollistettu atomien sekoittuminen hilassa. Jos kukin seosaine kasvattaa oman kiteensä ja vasta tämän jälkeen kiteet sekoittuvat keskenään, on kyseessä faasiseos. Seosaineet voivat myös muodostaa yhdisteen, joka sitten esiintyy yhtenä faasina aineessa. (Ansaharju ym. 1989, 14–15.)



KUVA 3. Kiteen atomien sekoittuminen hilassa (mukaiillen Ansaharju ym. 1989, 15)

Teräksessä seosaineet voivat olla joko liuenneina rauta-atomien muodostamaan kidehiltaan tai kemiallisina yhdisteinä muodostaen erillisiä kiteitä. Tällaisia yhdisteitä kutsutaan yhteisellä nimellä karbideiksi, joista tyypillisin on raudan ja hiilen muodostama sementtiitti ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Karbidien lisäksi teräksessä esiintyy suuri määrä muitakin yhdisteitä, jotka muodostavat erilaisia sulkeumia ja erkaumia. Tällaisia ovat oksidit, sulfidit, silikaatit, nitridit ja niiden yhdistelmät. Oksideja, sulfideja ja silikaatteja kutsutaan yhteisellä nimellä kuonasulkeumiksi ja ne ovat yleensä haitallisia teräkselle. Etenkin suuret oksidisulkeumat ovat haitallisia, koska ne heikentävät teräksen väsymislujuutta. Haitallisista vaikutuksista huolimatta epämetallisia sulkeumia voidaan hyödyntää tiettyjen ominaisuuksien parantamisessa, kuten lastuttavuuden. (Metallinjalostajat 2014, 5.)

## 2.2 Teräksen valmistus

Teräksen valmistus jaetaan raakaraudan valmistukseen ja itse teräksen valmistukseen (Ansaharju ym. 1989, 19). Tässä osiossa käsitellään pääasiassa teräksen valmistuksen vaiheita seostamiseen asti. Eri prosessit poikkeavat toisistaan valmistaja kohtaisesti hyvin paljon, joten tarkoituksena on antaa kokonaiskuva teräksen valmistuksesta.

Teräksen valmistuksessa pääraaka-aineena käytetään rautamalmia tai kierrätysterästä (Teräksen kierrätys). Vuonna 2014 rautamalmin osuus maailman terästuotannossa oli noin 60 % (Metallinjalostajat 2014, 9). Raakaraudan ja lopputuotteen laatu sekä käytetyn kierrätysteräksen osuus vaikuttavat valmistusmenetelmän valintaan (Ansaharju ym. 1989, 23).

Teräs on arvokas materiaali ja sen valmistaminen vaatii paljon energiaa. Teräksellä on kuitenkin merkittävä etu, koska sitä voidaan kierrättää lähes loputtomiin ilman sen ominaisuuksien heikkenemistä. Teräs onkin maailman kierrätetyin materiaali. Malmipohjaisessa teräksen valmistuksessa voidaan käyttää 20–40 % kierrätysterästä aina valmistusmenetelmän mukaan. Kierrätysteräksen lisäksi kuitenkin myös malmista valmistettua terästä tarvitaan, koska teräksen käyttö kasvaa koko ajan eikä kierrätysteräs riitä kattamaan kysyntää. (Teräksen kierrätys.) Suomessa käytöstä poistuneista terästuotteista saatiin 94 % takaisin kiertoon raaka-aineeksi (Metallinjalostajat 2014, 107).

Metallien jalostus ja tuotanto on Suomessa vahvan osaamisen ala. Suomen prosessit ovat tunnetusti energian ja raaka-aineiden käytöstään tehokkaita, joissakin jopa maailman johtavia. Alalle kehitetään

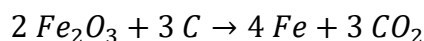
jatkuvasti uusia valmistusmenetelmiä ja tuotantotekniikkaa kestävästä kehitystä ajatellen. (Sorsa 2015, 101.)

### 2.2.1 Raudan ja malmipohjaisen teräksen valmistus

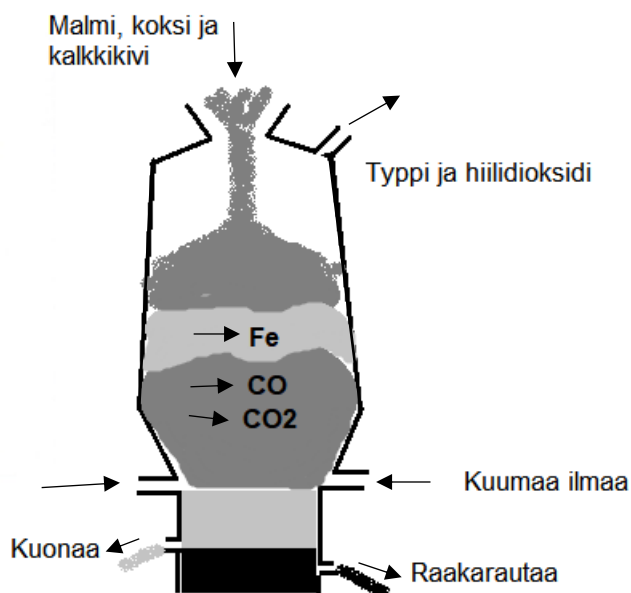
Malmipohjaisessa teräksen valmistuksessa malmi rikastetaan erottamalla se sivukivestä. Malmi murskataan ja jauhetaan hienoksi siten, että malmi- ja sivukivimineraalit ovat erillään toisistaan. Syntyneitä rikastejauhetta ei voida kuitenkaan käyttää sellaisenaan raudan valmistuksessa, vaan rikaste on saatettava kappalemuotoon eli se on agglomeroitava. (Sorsa 2015, 101.) Menetelmiä ovat sintraus, pelletointi ja briketointi. Sintrauksen käyttö on kuitenkin jäämässä pois Suomessa. (Metallinjalostajat 2014, 18.)

Rautaa valmistetaan jatkuvatoimisissa kuilu-uunissa eli masuunissa. Masuuniin panostetaan sintteriä, pellettiä tai palamalmia. Panos sisältää rauta oksidien lisäksi sivukiveä, joka koostuu pääosin piin, kalsiumin, alumiinin ja magnesiumin oksideista. (Sorsa 2015, 102.)

Rautaoksidin pelkistäminen raudaksi tapahtuu masuunissa. Masuunin yläpuolelta syötetään rautamalmia, koksia ja kalkkikiven seosta. Alapuolelta puhalletaan kuumennettua ilmaa. Palava hiili eli koksia muodostaa häkää, joka pelkistää rautaoksidin. (Sorsa 2015, 102.) Rautaoksidille tapahtuva pelkistymisreaktio:



Raudan pelkistyessä hiili hapettuu hapen kanssa muodostaen hiilidioksidia (Sorsa 2015, 28). Syntynyt raakarauta valuu sulana masuunin alaosaan. Kalkkikivi muodostaa malmissa olevien aineksien kanssa kuonaa, joka jää raudan pinnalle suojaamaan sitä hapettumiselta. Puhallusilman sisältämä typpi ja syntynyt hiilidioksidi kiertävät lämmittämässä puhallettavaa ilmaa. (Sorsa 2015, 102.) Kuvassa 4 on havainnollistettu masuunin toiminta ja rakenne.

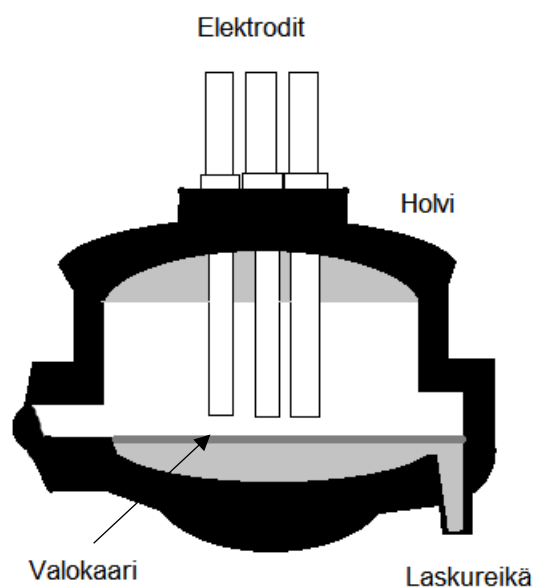


KUVA 4. Masuuni (mukaiillen Sorsa 2015, 102)

Syntyneessä raakaraudassa hiilipitoisuus on noin 4 %. Sen lisäksi se sisältää piitä, mangaania, fosforia ja rikkiä. Hiilipitoisuuden vähentäminen 0,05–1,7 % alueelle on keskeistä teräksen valmistuksessa. Hiiltä poistetaan mellottamalla eli sula raakarauta käsitellään hapella. (Ansaharju ym. 1989, 23.) Hiili reagoi hapen kanssa muodostaen hiilimonoksidikaasua. Muodostunut hiilimonoksidikaasu poistetaan prosessista, jolloin ylimääräinen hiili saadaan pois. (Sorsa 2015, 102.) Mellotuksessa syntyvää lämpöä ja sen aiheuttamaa sulan liiallista kuumenemistä estetään lisäämällä sulaan kierrätysterästä (Metallinjalostajat 2014, 9). Mellotuksessa poistuu samalla muita epäpuhtauksia eli sula raffinoidaan (Ansaharju ym. 1989, 23). Mellotus tapahtuu konvertterissa. Happipuhallusmenetelmiä ovat LD-menetelmä ja OBM-menetelmä (Sorsa 2015, 102). LD-menetelmässä happi puhalletaan konvertteriin ylhäältä vesijäähdytetyn putken kautta, josta 3–6 reikää ohjaavat happisuihkut sulaan. OBM-menetelmässä happi puhalletaan pohjassa olevien suuttimien kautta. OBM-menetelmän prosessin kulku on periaatteessa samanlainen kuin LD-menetelmässä. (Metallinjalostajat 2014, 35.) Valtaosa käytöissä olevista konverttereista on erityyppisiä yhdistelmäkonverttereita. Jäljelle jäävät epäpuhtaudet poistetaan mellotuksen jälkeen senkkäkäsittelyssä. (Sorsa 2015, 102.)

### 2.2.2 Teräksen valmistus kierrätysteräksestä

Vuonna 2015 tuotetusta teräksestä lähes puolet valmistettiin kierrätysteräksestä. Kierrätysteräksen sulatus ja mellotus tapahtuvat valokaariuunissa, minne kierrätysterästä voidaan panostaa 10–150 tonnia. Sulatus on kestoaltaan lyhyt, minkä jälkeen sulan ominaisuuksiin vaikutetaan senkkäkäsittelyssä. (Sorsa 2015, 103.) Suurimpien valokaariuunien kapasiteetti on yli miljoonaa tonnia vuodessa (Metallinjalostajat 2014, 9). Kuvassa 5 on havainnollistettu valokaariuunin rakenne.



KUVA 5. Valokaariuuni (mukaillen Metallinjalostajat 2014, 37)

### 2.2.3 Fossiilivapaan teräksen valmistus

Nykyisin terästeollisuus on yksi suurimmista hiilidioksidipäästöjen aiheuttajista (UKK. Vastaukset keskeisiin kysymyksiin). Sen osuus hiilidioksidipäästöistä on tällä hetkellä 7–9 %, joka on noin kolme kertaa enemmän kuin lentoliikenteen osuus maailmanlaajuisesti (Sipola 2021).

Vuonna 2016 SSAB, LKAB ja Vattenfall käynnistivät HYBRIT-hankkeen, jonka tavoitteena on muuttaa teräksenvalmistus fossiilivapaaksi ja siten kestävästä kehityksestä edistävää. Malmipohjaisessa teräksen valmistuksessa korvattaisiin käytetty koksi fossiilivapaalla sähköllä ja vedyllä. (HYBRIT®. Uusi vallankumouksellinen teräksenvalmistuksen teknologia.) Valmistettavan fossiilivapaan teräksen laatu

ja ominaisuudet pysyvät samana kuin perinteisen teräksen, koska sen ominaisuudet luodaan vasta myöhemmin valmistus- ja lämpökäsittelyprosesseissa. (UKK. Vastaukset keskeisiin kysymyksiin.)

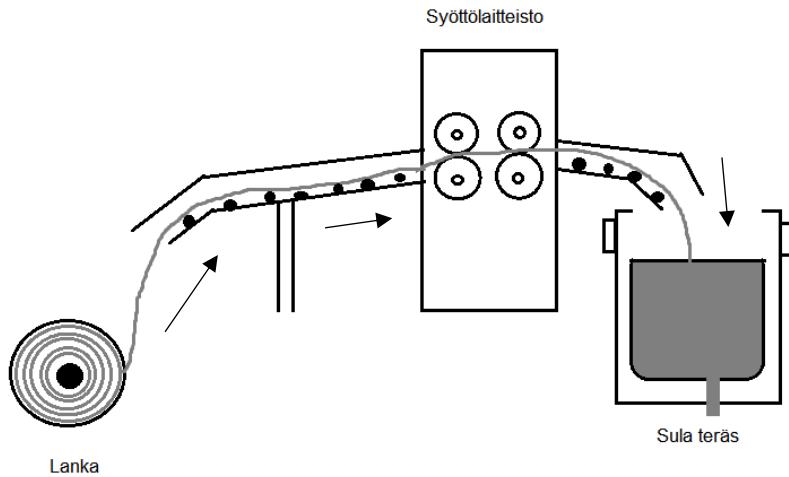
SSAB on tuottanut tähän mennessä malmipohjaista fossiilivapaata terästä noin 24 tonnia. Yrityksellä on tavoitteena toimittaa vuonna 2026 markkinoille kaupallisia määriä fossiilivapaata terästä sekä ottaa kehitetty HYBRIT-tekniikka käyttöön teollisessa mittakaavassa. Tällä hetkellä fossiilivapaan teräksen tuotanto on 20–25 % perinteistä valmistusmenetelmää kalliimpaa. (Sipola 2021.)

#### **2.2.4 Sulan jatkokäsittely ja seosaineiden seostus**

Uunista teräs kaadetaan valusankoon eli senkkaan kuljetuksia ja jatkokäsittelyjä varten. Senkkäkäsittelyissä teräksestä poistetaan haitalliset aineet ja siihen lisätään halutut seosaineet. Kyseessä on siis usein sulan viimeistelyvaihe, jossa koostumus tarkennetaan halutuksi. Teräksen epäpuhtaudet pyritään poistamaan sulkeumia sitovan pintakuonan avulla sulan sekoituksen aikana. Pintakuonan poisto tapahtuu ennen sulan varsinaista kaatoa. (Ansaharju ym. 1989, 24; Sorsa 2015, 103.)

Sulan lämpötila nostetaan ja tasataan lopuksi valua varten. Seosaineet voidaan lisätä injektointi- tai langansyöttömenetelmällä (Metallinjalostajat 2014, 45; Sorsa 2015, 103). Injektoinnissa pienennetään teräksen rikkipitoisuutta sekä sidotaan rikki vähemmän haitalliseen muotoon. Menetelmää käytetään myös seosaineiden lisäykseen. Seostaminen tapahtuu injektoimalla sulaan argonkaasua, jossa seosaineet ovat hienojakoisena jauheena. (Sorsa 2015, 103.)

Langan syöttö on viime vuosina syrjäyttänyt injektointimenetelmän. Molemmissa menetelmissä tavoite on sama eli poistetaan teräksestä rikin lisäksi happea, lisätään halutut seosaineet ja muunnetaan sulkeumien koostumusta ja rakennetta haluttuun muotoon. Käytettävä lanka on ohutseinäistä teräsputkea, joka on täytetty jauheella. Lanka on kelana, josta syöttölaite purkaa sitä halutulla nopeudella senkkaan. Langan seinämä sulaa ja jauhe leviää tasaisesti terässulaan reagoiden sen kanssa. Langansyöttötekniikalla päästään tarkempiin pitoisuuksiin ja siten pystytään vähentää seosaineiden hävikkiä. Jos seosaineita tarvitaan suurempia määriä, niiden pitoisuus ei ole välttämättä haluttu loppuvaiheessa, jolloin koostumusta voidaan langan syötöllä vielä tarkentaa. (Metallinjalostajat 2014, 45.) Kuvassa 6 on havainnollistettu langansyöttötekniikka.



KUVA 6. Langan syöttö (mukaihen Metallinjalostajat 2014, 45)

Teräs on käsittelyjen ja seostuksen jälkeen tiivistetty, jos siinä on tarpeeksi happea sitovia aineita. Tällöin teräksen jähmettymisen aikana ei muodostu kaasunkaloita. Tiivistämättömästä teräksestä vapautuu jähmettymisen aikana CO-kaasua, jolloin teräs jää huokoiseksi. Niukkahiilisten terästen tiivistykseen käytetään piitä tai alumiinia. (Metallinjalostajat 2014, 45.) Tyhjiökäsittelyssä poistetaan teräksestä siihen liuenneita kaasuja. Tavallisimmin tavoitteena on vähentää teräksen vetypitoisuutta. (Sorsa 2015, 104.)

Sula teräs saatetaan kiinteään muotoon lämpötilaa laskemalla, jolloin sula jähmettyy jatkokäsittelyjä varten. Tämä tapahtuu nykyisin pääosin jatkuvavaluna, joka tuottaa aihioita valssausta varten. (Metallinjalostajat 2014, 48.) Vuodesta 1991 lähtien Suomessa on ollut käytössä vain jatkuvavalu ja koko maailman terästuotannosta jatkuvavalun osuus on 87 % (Metallinjalostajat 2014, 11). Jatkuvavalussa teräs lasketaan valusangosta välialtaan kautta vesijähdytteiseen kuparikokilliin, jossa aihio saa halutun muodon (Metallinjalostajat 2014, 48). Aihoiden lopullinen koko ja muoto riippuvat valmistettavasta lopputuotteesta. Valssauksessa terästuotteelle annetaan sen muoto. Käytettäviä päämenetelmiä on kaksi: kuuma- ja kylmävalssa. (Metallinjalostajat 2014, 51.)



### 3 TERÄKSEN OMINAISUUKSIA

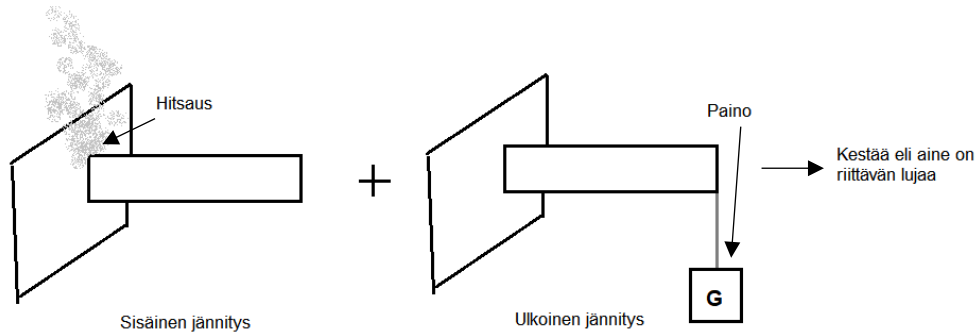
Materiaaleja valittaessa käyttäjä tarvitsee tietoa, jotta pystyy valitsemaan käyttöön ja kohteeseen soveltuvan materiaalin. Tarvitaan tietoa muun muassa materiaalin koostumuksesta, ominaisuuksista, soveltuvuudesta käyttötarkoitukseen ja -kohteeseen. Näiden lisäksi käyttäjän tulee tietää kyseisen materiaalin standardoinnista. (Ansaharju ym. 1989, 6.)

Materiaaleja valittaessa niitä voidaan tarkastella useammasta näkökulmasta. Niitä voidaan tarkastella käytön näkökulmasta eli kuinka ne kestävät ja käyttäytyvät lopullisessa tuotteessa. Tällöin kiinnitetään huomiota ominaisuuksia tarkastellessa muun muassa siihen millainen on materiaalin lujuus, kovuus, sitkeys, kimmoisuus ja syöpymiskestävyys. Metallitöiden tekijän näkökulmasta on sen sijaan tärkeää tietää, millainen on materiaalin muovattavuus ja muokattavuus, lämpökäsiteltävyys, lastuttavuus sekä hitsattavuus. (Ansaharju ym. 1989, 10.)

Teräksen lopullisten ominaisuuksien kannalta keskeisiä tekijöitä ovat sen hiilipitoisuus, kiderakenne ja sen seostus eli sen sisältämät seosaineet (Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 35). Muuttamalla näitä pystytään teräksen ominaisuuksia hallitsemaan ja näin saadaan lopulliselle tuotteelle halutut ominaisuudet.

#### 3.1 Lujuus ja jännitys

Lujuus voidaan yleisesti määritellä materiaalin kykyä kestää jännitys. Luja materiaali ei murru jännityksen myötä. Ulkoinen kuormitus tai sisäiset voimat voivat aiheuttaa jännitystä aineen rakenneosiin. Sisäisiä voimia saa aikaan aineen valaminen, takominen, hitsaus eli sisäiset voimat syntyvät materiaalin käsittelystä. (Ansaharju ym. 1989, 11.) Kuvassa 7 on havainnollistettu lujuus käsitteenä.

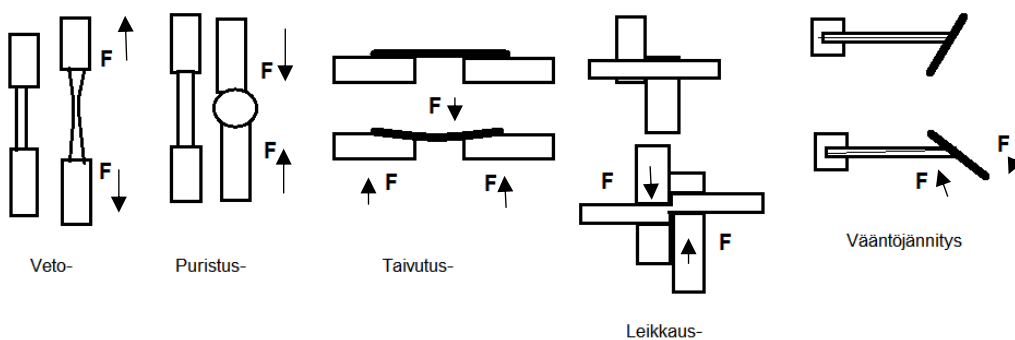


KUVA 7. Sisäinen ja ulkoinen jännitys (mukaiillen Ansaharju ym. 1989, 11)

Lujuuden tunnus on  $R$  ja yksikkö  $N/mm^2$ . Jännitys voidaan myös eritellä tapauskohtaisesti. Voidaan puhua veto-, puristus-, taivutus-, leikkaus- ja vääntöjännityksestä. Kuvassa 8 on esitetty jännitys tapauskohtaisesti. Eri materiaaleille on määritetty lujuusarvoja, jotka on taulukoitu. Yksi tärkeä lujuusarvo on vetomurtolujuus  $R_m$  eli suurin mahdollinen vetolujuus, jonka kappale kestää ilman sen murtumista. Vetolujuus  $R_m$  saadaan kaavasta:

$$R_m = \frac{F}{A},$$

missä  $F$  on vetävä voima ja  $A$  on aineen poikkipinta-ala. (Ansaharju ym. 1989, 11.)



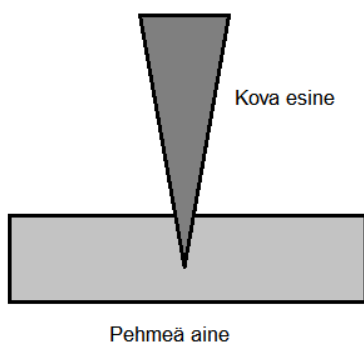
KUVA 8. Jännitystapauksia (mukaiillen Ansaharju ym. 1989, 11)

### 3.2 Kovuus

Kovuus voidaan yleisesti määritellä materiaalin kykynä vastustaa siihen tunkeutuvaa esinettä, naarmuuntumista, kulumista tai leikkausta (Sorsa 2015, 56). Toisin sanoen materiaali on sitä kovempaa, mitä vähemmän toinen esine pystyy siihen tunkeutumaan voiman pysyessä vakiona (Ansaharju ym. 1989, 12). Kuvassa 9 on havainnollistettu kovuus käsitteenä. Materiaalin kovuuteen vaikuttaa useampi materiaaliominaisuus, kuten muun muassa kyseisen materiaalin vetomurtolujuus, sitkeys ja kimmoisuus. Tämän vuoksi kovuus ei oikeastaan itsessään ole materiaaliominaisuus. (Sorsa 2015, 56.)

Yleisesti teräksen kovuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat sen valmistuksessa käytetyt seosaineet, valmistuksen aikaiset lämpökäsittelyt ja lopullisen tuotteen pintakäsittely (Sorsa 2015, 57). Teräksen kovuus riippuu sen hiilipitoisuudesta ja kiderakenteesta (Ansaharju ym. 1989, 173).

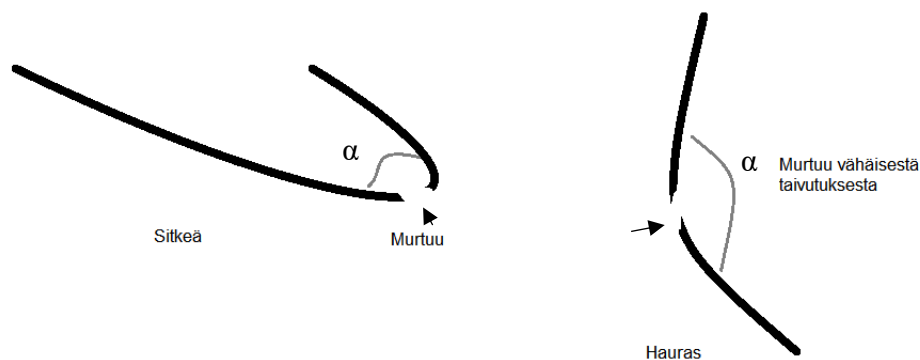
Myötörajalla tarkoitetaan aineen vetojännitystä sillä hetkellä, kun aineessa tapahtuu pysyvä muodonmuutos (Lassila 2016, 10). Yleisesti puhuttaessa, mitä pienempää teräksen kide on, sitä suurempi aineen myötöraja. Suurempi kidekoko, halkaisijaltaan 0,025 mm, antaa niukkahiilisille teräksille myötörajan noin 100 MPa:n alueelle. Muutettaessa kidekoko pienemmäksi, halkaisijaltaan 0,0025 mm, myötöraja kasvaa yli 500 MPa alueelle. Täten lopullisen kidekoon saavuttaminen 2–10 µm:n alueelle teräksen valmistuksen yhteydessä on erittäin vaivanarvoista kovuuden näkökulmasta. (Bhadeshia & Honeycomb 2017, 40.)



KUVA 9. Kovuus (mukaiillen Ansaharju ym. 1989, 12)

### 3.3 Sitkeys

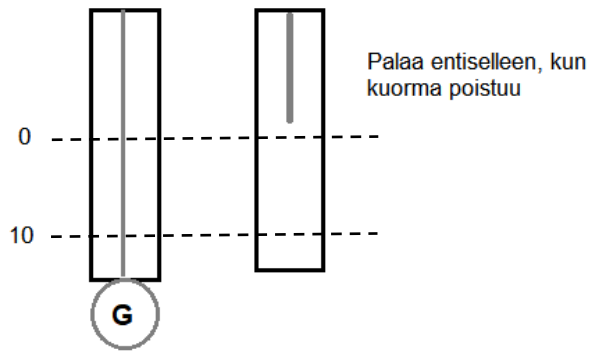
Sitkeys voidaan yleisesti määritellä materiaalin murtamiseen vaadittavana energia määränä (Jokinen 2019, 15). Kuvassa 10 on esitetty sitkeä ja hauras materiaali. Sitkeys edellyttää materiaalilta lujuuden lisäksi venyvyyttä (Jokinen 2019, 17). Materiaaleja valittaessa koneenosissa käytettävältä materiaalilta vaaditaan käyttökohteen ja -tarkoituksen vuoksi iskusitkeyttä. Käytön aikana niihin kohdistuu usein toistuva iskumainen kuormitus. (Ansaharju ym. 1989, 12.) Teräksen sisältämät kuonasulkeumat heikentävät sen sitkeyttä (Metallinjalostajat 2014, 5).



KUVA 10. Sitkeä ja hauras aine taivutuksessa (mukaiillen Ansaharju ym. 1989, 12)

### 3.4 Kimmoisuus

Kimmoisuus voidaan yleisesti määritellä materiaalin kykynä vastustaa muodonmuutosta voiman vaikutuksesta. Kimmoinen aine ei muovaudu vaan palaa takaisin alkuperäiseen muotoonsa vaikuttavan voiman lakattua. Kuvassa 11 on havainnollistettu kimmoinen kappale. Kimmoisia aineita ovat muun muassa kumi ja teräs. Kupari sen sijaan muovautuu helposti. (Ansaharju ym. 1989, 12.)



KUVA 11. Kimmoisuus (mukaiillen Ansaharju ym. 1989, 12)

### 3.5 Korroosionkestävyys

Korroosionkestävyys voidaan yleisesti määritellä materiaalin kykyä vastustaa siihen kohdistuvaa syövyttävää vaikutusta eli korroosiota. Korroosiota voi aiheuttaa muun muassa materiaalin ympäristö tai erilaiset hapot ja emäkset. (Ansaharju ym. 1989, 12). Kuvassa 13 on esitetty erilaisia korroosio tyyppejä.

Metallit ovat jaloudeltaan erilaisia. Sähkökemiallisessa jännitesarjassa erilaiset metallit ovat lueteltuna epäjaloinnasta jaloimpaan. Epäjalot metallit syöpyvät helposti, kun taas jalot metallit pystyvät vastustaan syöpymistä. Mitä etäämpänä toisistaan metallit ovat sähkökemiallisessa jännitesarjassa, sitä voimakkaampi on aiheutuva syöpyminen. (Ansaharju ym. 1989, 157–158.) Kuvassa 12 on sähkökemiallinen jännitesarja, jossa näkyy erilaisten terästen jalous verrattaessa muihin metalleihin.



KUVA 12. Metallien sähkökemiallinen jännitesarja merivedessä (25 °C) (mukaiillen Sorsa 2015, 39)

Yleisesti korroosiolla tarkoitetaan metallin ja ympäristön välillä tapahtuu sähkökemiallista reaktiota, joka aiheuttaa metallin syöpymisen lisäksi sen lujuuden heikkenemistä. Käytännössä korrosio tapahtuu olosuhteissa, joissa on vettä osallisena. Tällöin epäjalompi metalli tai samankin metallin epäjalompi osa pyrkii liukenemaan ja jalompi osa pysyy suojattuna. (Sorsa 2015, 39.)

Rauta aineena reagoi helposti hapen kanssa etenkin, jos se joutuu vuorovaikutukseen veden kanssa. Raudan hapettumisreaktiota kutsutaan ruostumiseksi. Ruoste on koostumukseltaan pääosin rautaoksidien ja rautahydroksidien seosta. Ruoste on huokoista, joten raudasta valmistetut esineet voivat ruostua vähitellen kokonaan. Monet muut metallit sen sijaan hapettuvat vain pinnalta. (Sorsa 2015, 28.)

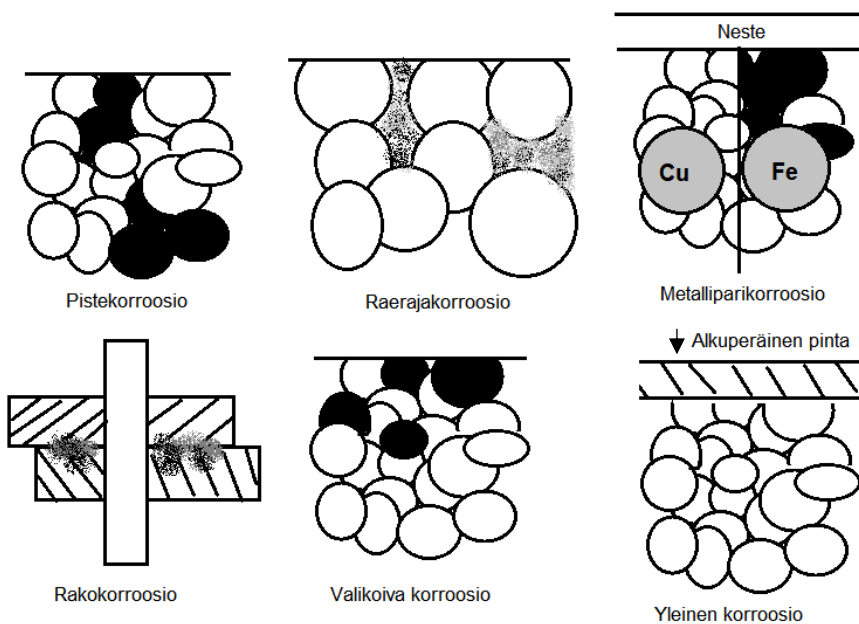
Metalliseosten raerajoille voi muodostua yhdisteitä, jotka heikentävät korroosionkestävyyttä. Tällöin syövyttävissä olosuhteissa metalliseos syöpyy voimakkaasti raerajoja pitkin. Raerajakorroosiota edesauttavia tekijöitä ovat muun muassa raerajoille suotautuvat epäpuhtaudet, tietyn seosaineen rikastuminen raerajoille tai köyhtyminen läheisyydessä raerajaerkamien takia. (Sorsa 2015, 47.)

Jännityskorroosiossa metalliin muodostuu murtumia, jotka syntyvät korroosion sekä pinnassa vaikuttavien vetojännitysten takia. Vetojännitystä aiheuttavat ulkoiset ja sisäiset jännitykset. Sisäiset jännitykset ovat erityisen vaarallisia, koska niiden kokoa on hankala ennustaa ja ne ovat usein lähes metallin

myötölujuuden suuruisia. Tilanne muuttuu vaaralliseksi molempien jännitysten vaikuttaessa samanaikaisesti. Jännityskorroosiotaipumukseen vaikuttavia tekijöitä ovat metallin koostumus ja mikrorakenne. Happi ja muut voimakkaat hapettajat lisäävät jännityskorroosiota, joten poistamalla happiliuoksesta voidaan estää jännityskorroosion syntymistä. Seostetuilla teräksillä yleinen jännityskorroosion tyyppi on vetyhauraus, jossa rakenteen haurastuminen on seurausta teräkseen seostuneesta vedystä. Vaikka jännityskorroosio on hyvin yleinen ja haitallinen ei sitä kuitenkaan vielä ymmärretä täysin ilmiönä. (Sorsa 2015, 49.)

Yleisesti korroosion muodostumiseen voidaan vaikuttaa käyttämällä oikeanlaista materiaalia kuhunkin käyttötarkoitukseen ja -kohteeseen. Korroosioalttiissa paikoissa tulee välttää jaloudeltaan erilaisten metallien käyttöä. Voidaan käyttää myös metalliseoksia, joilla on oksidikerros suojaamassa. (Ansa-harju ym. 1989, 160.)

Teräksen tai muiden metalliseosten seostuksen aikana voidaan lisätä seosaineina kromia, kuparia tai nikkeliä. Seosaineet muodostavat pintaan suojaavan oksidikerroksen, jolloin korroosionkestävyys paranee. Jos pinta vahingoittuu, oksidikalvo pyrkii korjautumaan välittömästi hapen vaikutuksesta, mutta jos itse oksidikalvo vaurioituu se voi johtaa korroosion muodostumiseen. Eri seosaineet vaikuttavat korroosiokestävyyteen eri tavalla, joten käytettävä teräslaji on valittava käyttökohteen mukaan. (Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 41.)



KUVA 13. Korroosio tyyppejä (mukaihen Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 31)

### 3.6 Muovattavuus ja muokattavuus

Muovattavuus voidaan yleisesti määritellä materiaalin kykynä muuttaa muotoaan. Metallit ovat kimmoisia aineita, jotta ne voidaan muovata, pitää aiheuttaa sellainen sisäinen jännitys, että saadaan aikaan pysyvä muodonmuutos. Muokkautuminen tapahtuu plastisen muodonmuutoksen avulla. Muokattavuus on sitä parempi, mitä suurempi muodonmuutos saadaan aikaan aineen rikkoutumatta. (Sorsa 2015, 63.)

Plastinen muodonmuutos on kytköksissä voimakkaasti metallin mikrorakenteeseen, koska se edellyttää sidosten murtumista ja uudelleen muodostumista. Tätä helpottaa viivamainen kidevirhe eli dislokaatiot, joiden vaikutusta vaimentaa monet muut kidevirheet muun muassa raerajat ja liuenneet atomit. (Jokinen 2019, 19.)

Yleisesti pehmeä ja kimmoton aine on hyvin muovattavissa. Metallien kohdalla puhutaan muokkaamisesta, koska aineen muut ominaisuudet kuten lujuus muuttuvat samalla. Terästen ja muiden metallien kohdalla takominen, valssaaminen ja vetäminen perustuvat niiden muokattavuuteen. (Ansaharju ym. 1989, 12.)

### 3.7 Lämpökäsiteltävyys

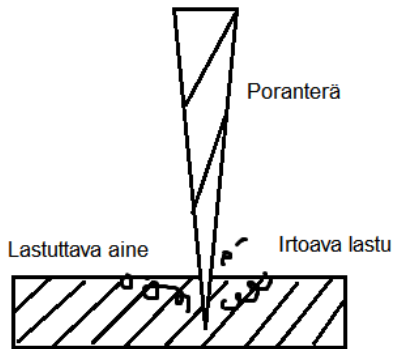
Lämpökäsiteltävyys voidaan yleisesti määritellä siten, että kuinka helposti materiaali voidaan lämpökäsitellä. Lämpökäsiteltävä metalli saadaan esimerkiksi lämmittämällä, hehkuttamalla ja jäähdyttämällä hitaasti tai nopeasti haluttuun lopputulokseen kovaksi, pehmeäksi tai lujaksi. (Ansaharju ym. 1989, 13.)

### 3.8 Lastuttavuus

Lastuttavuus voidaan yleisesti määritellä lastuttavan materiaalin lastuttavuusominaisuuksien eli sen aiheuttaman terien kulumisen ja lastunmuodostuksen kokonaisuutena. Lastuttavuus ei ole yksiselittei-



sesti mitattava suure, joka voitaisiin ilmaista jollakin asteikolla tai lukuarvona. Hyvä lastuttavuus tarkoittaa sitä, että lastuaminen on häiriötöntä ja terän kestoikä on suhteellisen pitkä. (Sandvik Coromant.) Poraaminen, sorvaaminen ja jyrsiminen ovat tyypillisiä lastuamismenetelmiä (Ansaharju ym. 1989, 13). Kuvassa 14 on havainnollistettu lastuttavuutta.



KUVA 14. Lastuavaa työstöä (mukaiillen Ansaharju ym. 1989, 13)

### 3.9 Hitsattavuus

Hitsattavuus voidaan yleisesti määritellä siten, että metalli voidaan ilman erityistoimenpiteitä hitsata hyvään lopputulokseen. Erityistoimenpide voi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että kappaleet pitää esilämmittää ennen hitsausta. (Ansaharju ym. 1989, 13.) Teräksessä hitsauksen tekevät vaikeaksi sen sisältämät epäpuhtaudet ja sellaiset seosaineet, jotka esimerkiksi lisäävät karkenevuutta. Hyvin hitsattavien terästen hiilipitoisuus tulisi olla alle 0,25 %. (Sorsa 2015, 62.)

## 4 TERÄKSEN VALMISTUKSEN YLEISIMMÄT SEOSAINHEET

Seostuksessa sekoitetaan kahta tai useampaa ainetta keskenään, minkä tarkoituksena on luoda materiaalille tietyt ominaisuudet. Tavoitteena voi olla esimerkiksi syöpymiskestävyyden parantaminen puhtaaseen metalliin verrattuna. Metalliseoksissa eri metallit on sekoitettu toisiinsa niiden ollessa sulassa tilassa. Metalliseoksen ominaisuudet riippuvat seostuksessa käytetyistä seosaineista ja niiden pitoisuuksista. Näiden lisäksi metalliseoksen lopullisiin ominaisuuksiin vaikuttavat erilaiset lämpökäsittelyt sen valmistusprosessissa. (Ansaharju ym. 1989, 67.)

Puhdas rauta on harmaa pehmeä metalli, jolla ei siinä muodossa ole juurikaan teknistä käyttöä. Seostamalla rautaan hiiltä ja jonkin verran muita seosaineita saadaan valmistettua terästä, jonka ominaisuudet mahdollistavat sen käytön suuremmissa mittakaavassa puhtaaseen rautaan verrattuna. (Ansaharju ym. 1989, 164.) Teräksen ominaisuuksia on mahdollista säätää hyvin laajalle alueella niiden koostumuksen ja valmistusteknologioiden ansiosta (Teräs materiaalina b). Viimeisen neljänkymmenen vuoden aikana tapahtunut kehitys on vaikuttanut huomattavasti teräksen mekaanisiin ominaisuuksiin (Bhadeshia & Honeycomb 2017, 40).

Seosaineilla teräksen valmistuksen yhteydessä yleensä tarkoitetaan aineita, jotka vaikuttavat huomattavasti teräksen ominaisuuksiin joko suoraan tai muuttamalla sen mikrorakennetta (Bhadeshia & Honeycomb 2017, 101; Metallinjalostajat 2014, 4). Lisäyksien myötä yleensä myös uusia faaseja muodostuu, kuten karbideja, nitridejä ja oksideja. Muodostuneista faaseista osa voi kuitenkin rajoittua ainoastaan teräksen pintaosaan. (Bhadeshia & Honeycomb 2017, 101.)

Seostuksessa on huomioitava, että seosaineiden yhdistelmät kuitenkin vaikuttavat eri tavoin kuin kukin niistä erikseen (Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40). Joissain teräslajeissa käytetään hyvin pieniä määriä seosaineita, jolloin tällaisia seosaineita kutsutaan mikroseosaineiksi (Metallinjalostajat 2014, 45). Taulukossa 1 on lueteltu eri seosaineita ja niiden vaikutuksia teräksen ominaisuuksiin.

Teräksen valmistuksessa perusseosaineina käytetään hiiltä, piitä, mangaania ja usein myös alumiinia (Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40). Näiden lisäksi teräksessä esiintyy aina vaihtelevissa määrin epäpuhtauksina erilaisia kaasuja, kuten happea, vetyä ja typpeä (Ansaharju ym. 1989, 34). Yleensä seosaineet luokitellaan kahteen ryhmään niiden karbidi muodostus kyvyn mukaan. Karbideja

muodostavan ryhmän yleisimpiä seosaineita ovat kromi, molybdeeni, vanadiini, titaani, niobi ja volframi. Seosaineita, jotka eivät muodosta karbideja, ovat muun muassa mangaani, nikkeli, pii, alumiini ja kupari. (Metallinjalostajat 2014, 5; Sandvik Coromant.) Tyypillisiä mikroseosaineita ovat alumiini, niobi, vanadiini ja titaani (Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40).

TAULUKKO 1. Seosaineiden vaikutus teräksen ominaisuuksiin (mukaillen Ansaharju ym. 1989, 33)

Ominaisuus / Seosaine	C	N	Si	S	P	Co	Cr	Mn	Mo	Ni	V	W
Vetolujuus	^	v	^	●	v	^	^	^	^	^	^	^
Sitkeys	v	v	v	v	v	●	v	v	^	^	^	v
Lämmönkestävyys	^	v	●	v	v	^	^	^	^	^	^	^
Kuumamuovattavuus	v	v	v	v	v	v	●	v	●	^	●	v
Kylmämuovattavuus	v	v	v	v	v	v	●	/	v	/	●	<>
Lastuttavuus	<>	●	v	^	^	●	v	v	●	v	●	●
Korroosionkestävyys	●	v	^	v	^	^	^	^	^	^	^	v
Karkaistavuus	^	/	^	/	^	/	^	^	^	^	^	^
Hitsattavuus	v	/	●	v	v	v	v	v	v	v	v	/

, missä ^ vaikuttaa positiivisesti, v vaikuttaa negatiivisesti, ● ei vaikutusta, / ei pysyvää vaikutusta ja <> vaikuttaa eri tavoin riippuen hiilipitoisuudesta

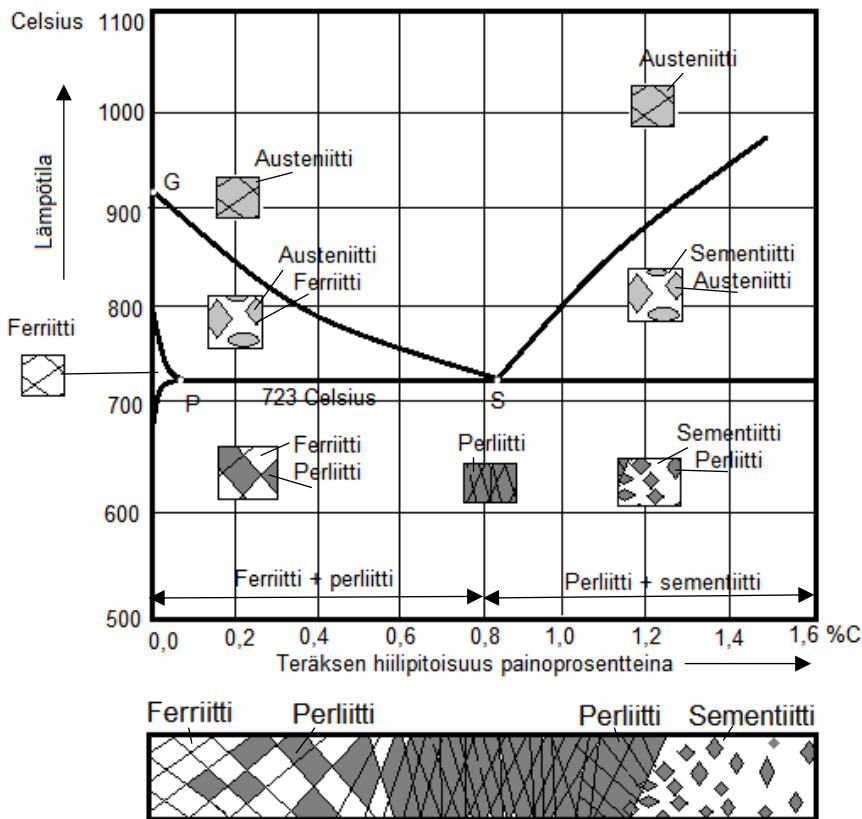
#### 4.1 Hiili

Hiili (C) on monipuolinen ja ihmisille tärkeä alkuaine. Sitä hyödynnetään niin energiantuotannossa kuin raaka-aineena kemianteollisuudessa. Teräksen valmistuksessa hiili on erikoisasemassa, koska sillä on ratkaiseva vaikutus teräksen lopullisiin ominaisuuksiin. Tämän vuoksi hiili on tärkein käytettävä seosaine. Teräksen metallurgia perustuu pääosin rauta-hiili-tasapainoon. (Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40; Sorsa 2015, 29.)

Hiilen vaikutus teräksen ominaisuuksiin on laaja ja se on ratkaiseva tekijä teräksen kovuuteen (Sorsa 2015, 29). Pitoisuuden kasvaessa teräksen lujuus ja karkaistavuus paranevat. Niukkahiilisiä teräksiä on hankala karkaista verrattuna runsashiilisiin teräksiin, jotka saadaan helposti kovaksi. (Ansaharju ym.

1989, 32; Metallinjalostajat 2014, 6.) Lastuttavuus myös paranee hiilipitoisuuden kasvaessa, koska teräksen sitkeys heikkenee. Tämä kuitenkin koskee pääosin keskihiilisiä teräksiä, sillä niukkahiilissä ja runsashiilissä teräksissä lastuttavuus heikkenee. Teräksen hitsattavuus on parhaillaan hiilipitoisuuden ollessa alle 0,25 %. Jos pitoisuus kasvaa siitä voivat hitsauksen myötä syntyneet jännitykset aiheuttaa murtumisen teräksessä. (Ansaharju ym. 1989, 32.)

Rauta-hiili-tasapainopiirroksista voidaan päätellä, millaiseksi teräksen mikrorakenne muodostuu hiilipitoisuuksien ja lämpötilan vaikutuksesta. Tasapainopiirros on laadittu puhtaille rauta-hiili-seoksille, mutta se kuitenkin pitää vielä paikkansa seosaineiden pitoisuuksien ollessa 5–6 %. (Metallinjalostajat 2014, 7.) Kaikkien rauta-hiiliseosten kiderakenne alkaa 723 °C lämpötilassa muuttua, eli puhutaan niiden muuttumislämpötilasta. Jos hiilipitoisuus on yli 2,6 % osa hiilestä ei ole sitoutuneena rautaan vaan erottuneena grafiitiksi eli hiilihiukkasiksi. Tämä onkin teräksen ja valuraudan välinen raja, sillä teräksessä kaikki hiili on yhtyneenä rautaan. Teräksiä ovat rautaseokset, joissa on hiiltä alle 2,6 % vaikka käytännössä raja on 1,7 %. (Ansaharju ym. 1989, 165.) Kuvassa 15 on esitetty rauta-hiili-tasapainopiirros. Teräksen eri mikrorakenteita eli faaseja nimitetään ferriitiksi, sementiitiksi, perliitiksi, martensitiksi ja austeniitiksi (Davis 1998, 155).



KUVA 15. Rauta-hiili-tasapainospiirros (mukailien Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 37)

#### 4.1.1 Ferriitti

Ferriitti on faasi, joka sisältää alhaisen hiilipitoisuuden lisäksi muutaman muun seosaineen, kuten piitä, kromia, mangaania ja nikkeliä. Rauta on huoneenlämpötilassa mikrorakenteeltaan aina ferriittiä. Sen ominaisuudet vaihtelevat sen rakenteen mukaan, mutta yleisesti ferriittinen teräs on pehmeää, sitkeää, helposti muovautuvaa ja sillä on heikko korroosionkestävyys. (Davis 1998, 156; Metallinjalostajat 2014, 7; Outokumpu.) Kuvassa 16 on esitetty ferriittinen rakenne.

Ferriitissä välisijaliuos aineet, kuten hiili ja typpi, pystyvät helposti liikkumaan tilakeskisen kuutiohilan läpi. Sen sijaan korvausliuos aineet, kuten mangaani ja nikkeli, eivät pysty liikkumaan sujuvasti tilakeskisessä kuutiohilassa. Tämän takia lämpökäsiteltäessä terästä välisijaliuos aineet reagoivat nopeasti. Hiilen huomattava vaikutus ferriittisen teräksen lujuuteen johtuu juuri tästä. Korvausliuos aineilla

on tutkitusti hyvin vähäinen vaikutus ferriitin lujuuteen. Hiilen lisäksi myös kidekoko vaikuttaa ferriittisen teräksen lujuuteen ja kovuuteen, kuten se vaikuttaa myös muihin teräslaatuihin. (Davis 1998, 156.)

Ferriitti voidaan stabiloida lisäämällä muita seosaineita, kuten piitä, kromia ja molybdeenia. Kyseiset seosaineet stabiloivat ferriittiä huoneenlämpötilassa, vähentäen austeniitin muodostumista, jolloin ferriitin alue rauta-hiili-tasapainopiirroksessa laajenee. (Davis 1998, 157.)



KUVA 16. Ferriittiä (mukaillen Metallinjalostajat 2014, 6)

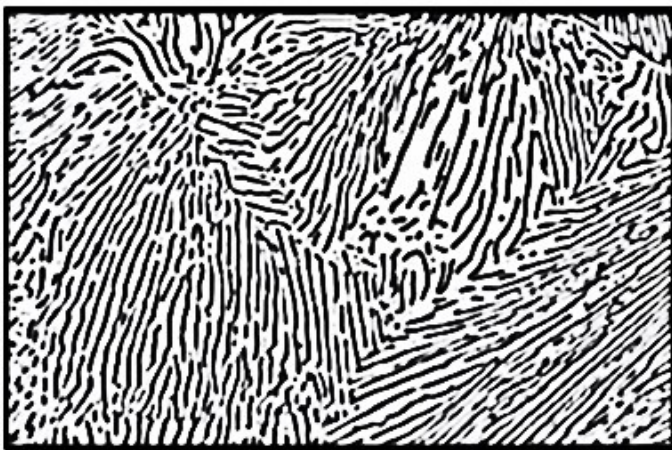
#### 4.1.2 Perliitti

Perliitti on faasi, jota alkaa esiintyä ferriitin rinnalla seoksen hiilipitoisuuden ylittyessä 0,05 %. Se koostuu pehmeään ferriitin lisäksi sementiitistä, joka on koostumukseltaan erittäin kova karbidi. (Davis 1998, 158–159; Metallinjalostajat 2014, 7.) Perliittiä muodostuu austeniittisessa tilassa olevan teräksen jäähtyessä. Sen hiilipitoisuus määrää muodostuvan mikrorakenteen eli muodostuuko ferriittis-perliittinen vai täysin perliittinen mikrorakenne. (Metallinjalostajat 2014, 7; Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 37.) Täysin perliittinen teräs muodostuu hiilipitoisuuden ollessa 0,8 %. Perliittinen teräs omaa erittäin vahvan lujisuuden, kovuuden ja kulumiskestävyyden, mutta se on haurasta eikä se kestä venytystä. Se on muovautuvaa, mutta yleensä ferriittinen teräs on kuitenkin vaivattomampaa muovata. Täysin perliittisen teräksen haurauden ja venymättömyyden takia sen käyttö on vähäistä, mutta sitä hyödynnetään esimerkiksi junaratojen raiteissa ja lankana sen lujisuuden takia. (Davis 1998, 158–159;

Metallinjalostajat 2014, 7.) Kuvassa 17 on esitetty perliittinen rakenne.

Hiilipitoisuuden noustessa yli 0,8 % alkaa sementtiittiä esiintyä perusrakenteen lisäksi myös raerajoilla. Raerajoille muodostunut sementtiitti on koostumukseltaan kovaa, mutta myös erittäin haurasta, jonka takia se on lämpökäsiteltävä ennen kuin sitä voidaan käyttää. (Metallinjalostajat 2014, 7.)

Perliitti esiintyy rakenteeltaan lamelleina, eli niin sanotusti levyinä. Niiden välien etäisyys on ratkaiseva tekijä perliittisen teräksen kovuuteen ja kulumiskestävyyteen. Lamellien etäisyyttä on helppo hallita sillä, se on ainoastaan riippuvainen seoksen muuttumislämpötilasta. (Davis 1998, 160.)

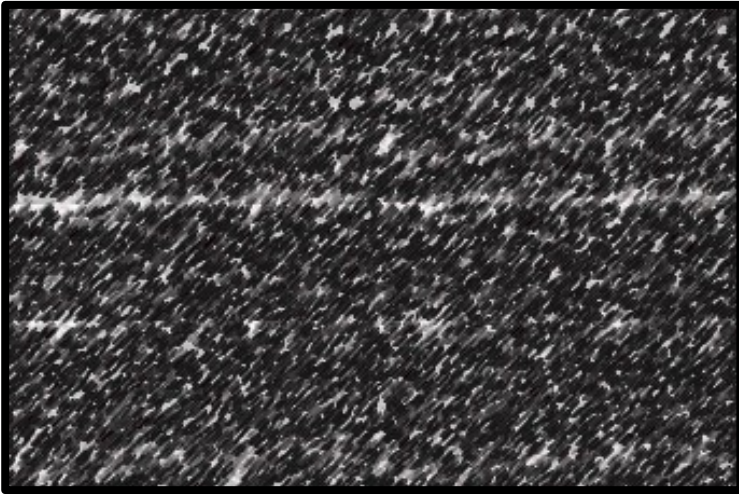


KUVA 17. Täysin perliittinen rakenne (hiiltä 0,8 %) (mukaiillen Metallinjalostajat 2014, 6)

#### 4.1.3 Martensiitti

Martensiitti on faasi, jota alkaa esiintyä, kun 750–920 °C lämpötilan yläpuolelle kuumennettu teräs jäähdytetään nopeasti. Jäähdytettäessä seos karkenee muodostaen kovaa martensiittia. (Metallinjalostajat 2014, 6.) Seos on ennen jäähdytystä rauta-hiili-tasapainopiirroksessa austeniitin alueella, koska tavoitteena on välttää ferriitin ja perliitin muodostumista. Martensiittisen teräksen ominaisuudet riippuvat sen hiilipitoisuudesta. Hiilipitoisuuden lisääntyminen parantaa sen kovuutta ja lujuutta, mutta heikentää sitkeyttä, mikä tekee siitä hauraan. Martensiittiset teräkset yleensä lämpökäsitellään, jotta niihin saataisiin parempi venyvyys ja sitkeys. (Davis 1998, 164; Outokumpu.)

Hiiliatomien määrä on huomattavasti suurempi martensiitissa kuin ferriitissä. Tämän takia tilakeskinen kuutiohila muuttuu muotoaan, saadakseen mahdutettua hiiliatomeja rakenteeseen, muodostaen tilakeskisen tetragonihilan. (Davis 1998, 164.) Kuvassa 18 on esitetty martensiittinen rakenne.



KUVA 18. Martensiittia (mukaillen Metallinjalostajat 2014, 6)

#### 4.1.4 Austeniitti

Austeniitti on faasi, jota esiintyy yli 911 °C lämpötilaan kuumennetussa puhtaassa raudassa. Se on hilamuodoltaan pintakeskinen kuutiohila, joka antaa rakenteensa takia teräkselle hyvän hitsattavuuden ja alhaisten lämpötilojen kestävyuden. (Davis 1998, 169; Metallinjalostajat 2014, 7.) Austeniittiset teräokset sisältävät suuren määrän seosaineita, mitkä tekevät niistä yleensä korroosionkestäviä. Ne ovat kuitenkin kalliita niiden valmistukseen käytettyjen seosaineiden takia ja niillä on huono vetolujuus, jota ei voida parantaa teräksen lämpökäsittelyillä. (Davis 1998, 169.) Kuvassa 19 on esitetty austeniittinen rakenne.

Ferriittiin verrattuna austeniitti pystyy liuottamaan itseensä hiiliatomeja suurissa määrin, jolloin sen pysyvyysalue rauta-hiili-tasapainopiirroksessa siirtyy alempiin lämpötiloihin. Austeniitin, kuten ferriitin, lujuutta voidaan parantaa lisäämällä välisijaliuos aineita, kuten hiiltä ja typpeä. (Davis 1998, 169; Metallinjalostajat 2014, 7.) Yleensä hiili pois suljetaan, koska se aiheuttaa kromikarbidiin muodostumista austeniitin raerajoille. Kromikarbidit kuluttavat kromin raerajoja, jolloin teräksestä tulee erittäin



taipuvainen korroosiolle. (Davis 1998, 169.) Austeniitin hajautuessa hiilipitoisuus määrää muodostuvan mikrorakenteen eli muodostuuko esimerkiksi ferriittis-perliittinen vai täysin perliittinen mikrorakenne (Metallinjalostajat 2014, 7).



KUVA 19. Austeniittia (mukaiillen Metallinjalostajat 2014, 6)

## 4.2 Pii

Pii (Si) on epämetalli, jonka tiheys on  $2,33 \text{ g/cm}^3$  ja sulamispiste  $1410 \text{ }^\circ\text{C}$ . Maankuoressa piin esiintyvyys on noin  $27,7 \%$ , mikä tekee siitä hapen jälkeen toiseksi yleisimmän alkuaineen maankuoressa. Puhdas pii on liian reaktiivinen löytyäkseen luonnosta. Sitä kuitenkin esiintyy lähes kaikissa mineraaleissa silikaattien muodossa, kuten piiksidina ( $\text{SiO}_2$ ). (Silicon.)

Piitä lisätään teräkseen hapenpoiston yhteydessä, sillä se sitoo happea ja tiivistää terästä. Lisätyn piin määrä vaihtelee valmistettavan teräslajin mukaan  $0,05 \%$  pitoisuudesta jopa  $0,5 \%$ . (Ansaharju ym. 1989, 34; Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40.) Pii parantaa teräksen korroosionvastustuskykyä sekä korkeissa että alhaisissa lämpötiloissa (Outokumpu). Piin lisäys kalsiumiin yhdistettynä mahdollistaa haitallisten epämetallisulkeumin muuntamisen edullisempaan muotoon, jolloin pystytään parantamaan teräksen valettavuutta ja lastuttavuutta (Metallinjalostajat 2014, 45).

Kokeellisesti tutkittaessa piin lisäyksen vaikutusta teräksen mikrorakenteeseen lämpökäsitellyissä teräksissä huomattiin, ettei piin lisäyksellä ole suurta merkitystä teräksen mikrorakenteen ja ominaisuuksien muutoksen kannalta ennen lämpökäsittelyitä. Piitä sisältävien seosten mikrorakenne muuttui lämpökäsittelyn myötä homogeenisemmaksi. Seokset, joiden sisältämä piin massaprosentti oli 1 %, korroosiokestävyys oli parempi kuin seokset, joissa piin massaprosentti oli 3 %. (Hebda, Dębecka & Kazior 2015, 1687, 1690.)

### 4.3 Mangaani

Mangaani (Mn) on harmaanvalkoinen metalli, jonka tiheys on välillä 7.21–7.44 g/cm<sup>3</sup> ja sulamispiste 1246 °C. Maankuoressa mangaanin esiintyvyys yhdisteenä on hyvin yleistä ja se on siirtymämetalleista raudan jälkeen toiseksi yleisin. Ominaisuuksiltaan se on hyvin samankaltaista kuin rauta, mutta se on kuitenkin kovempaa ja hauraampaa. (Manganese.) Seosaineena mangaani on edullista ja se on hiilen jälkeen eniten käytettyä. Se lisätään teräkseen hapenpoiston yhteydessä, koska se vaikuttaa teräkseen piin tavoin. (Ansaharju ym. 1989, 34; Sorsa 2015, 33.)

Kaikissa teräksissä on vähintään 0,3 % mangaania, mutta sen pitoisuus voi olla teräslajin mukaan jopa 1,5 % (Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40; Sorsa 2015, 33). Ylimääräisen hapen poiston lisäksi mangaania käytetään sitomaan rikkiä vähemmän haitalliseen muotoon. Sen käyttö teräksen valmistuksessa parantaa teräksen karkenevuutta, rakenteen kovuutta, kulumiskestävyyttä ja lujuutta. (Ansaharju ym. 1989, 34; Sorsa 2015, 33.) Mangaani vaikuttaa teräksen hitsattavuuteen ja sen takia sen pitoisuus ei saa olla kovin suuri hitsattavissa teräksissä. Mangaani parantaa yhtä hyvin kuin hiili teräksen lujuutta ilman, että sen iskusitkeys heikkenee. (Ansaharju ym. 1989, 34.)

Mangaanin atomit pyrkivät hiiliatomiin liittyessään muodostamaan sementtiittiä (Sorsa 2015, 33). Sen vaikutus ferriitin ja austeniitin tasapainoon on riippuvainen lämpötilasta. Korkeissa lämpötiloissa mangaani stabiloi ferriittiä, mutta alhaisissa lämpötiloissa se stabiloi sen sijaan austeniittia. Mangaani lisää typen liukenemista, jonka takia sitä käytetään korkeiden tyyppipitoisuuksien saavuttamiseen duplex- ja austeniittisissa ruostumattomissa teräksissä. Alhaisissa lämpötiloissa mangaani voi korvata myös jonkin verran seostuksessa käytettävää nikkeliä. (Outokumpu.)

#### 4.4 Alumiini

Alumiini (Al) on harmaanvalkoinen metalli, jonka tiheys on  $2,7 \text{ g/cm}^3$  ja sulamispiste  $660 \text{ }^\circ\text{C}$  (Alumiiniumi). Maankuoressa alumiinia esiintyy ainoastaan yhdisteinä, jossa sen osuus on noin 8 %, mikä tekee siitä yleisimmän metallin maankuoressa. Kyseessä on yleisesti käytettävä metalli, joka on luonteeltaan kevyttä ja lujaa. (Sorsa 2015, 35.)

Alumiini on yhdistyneenä epämetalleihin kovalenttislouhteisilla sidoksilla, minkä takia se reagoi sekä vahvojen happojen ja että emästen kanssa (Sorsa 2015, 35). Lisäämällä pieniä määriä alumiinia teräkseen voidaan tiivistää teräkselle haitallista happea ja typpeä (Metallinjalostajat 2014, 45; Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40). Sitä käytetään niin sanotuissa typetysteräksissä, joiden hyvä kulumiskestävyys perustuu niiden sisältämiin alumiininitridikiteisiin. Alumiininitridi vähentää myös rakeenkasvua, jonka takia sitä käytetään raekoon hallintaan tietyissä teräslajeissa. Seostuneena ferriitin hilaan tyellä on myös tapana aiheuttaa hitsauksen yhteydessä vanhenemistaipumista, jota voidaan estää alumiinin lisäyksellä. (Sorsa 2015, 35.)

#### 4.5 Kromi

Kromi (Cr) on erittäin kova harmaa metalli, jonka tiheys on  $7,15 \text{ g/cm}^3$  ja sulamispiste  $1970 \text{ }^\circ\text{C}$  (Ansaharju ym. 1989, 88; Chromium). Se on hyvin yleinen ja tärkeä seosaine etenkin ruostumattomissa teräksissä. Kaikki ruostumattomat teräkset sisältävät vähintään 10,5 % kromia, joka antaa niille niiden ominaisen korroosiokestävyyden. Kovuutensa ja korroosiokestävyytensä takia kromia käytetään myös metallien päällystykseen. (Ansaharju ym. 1989, 88; Outokumpu.) Teräksen valmistuksen yhteydessä se seostetaan puhtaan metallin sijasta ferrokromina (Sorsa 2015, 30).

Seostetulla kromilla on monipuolinen vaikutus teräksen ominaisuuksiin. Sen lisäys parantaa teräksen karkenevuutta, vetolujuutta, kovuutta, mutta se heikentää sitkeyttä. Kromi muodostaa teräksen pintaan hapen vaikutuksesta ohuen, kovan kromioksidikalvon, joka suojaa terästä korroosiolta. (Ansaharju ym. 1989, 33; Sorsa 2015, 30.) Kromipitoisuuden kasvaessa myös teräksen korroosiokestävyys paranee. Kromia käytetään ferriitin stabiloinnissa. (Outokumpu.) Kromiatomit liittyvät mielellään hiileen, mikä koventaa sementtiittiä parantaen joidenkin teräslajien kulumiskestävyttä. Korkeissa lämpötiloissa kromi poistaa grafiitin muodostumisen riskin sekä lisää teräksen hilseilykestävyyttä. (Sorsa 2015, 30.)

## 4.6 Kupari

Kupari (Cu) on punaruskea metalli, jonka tiheys on  $8,96 \text{ g/cm}^3$  ja sulamispiste  $1084 \text{ }^\circ\text{C}$  (Copper; Sorsa 2015, 36). Kupari on olemukseltaan pehmeää, sitkeää ja venyvää, jonka takia sitä on helppo muovata. Maankuoressa sitä esiintyy noin 70 g tonnissa. Kuparia käytetään niin seostettuna kuin seostamattomana. Sitä käytetään etenkin sähköjohtimissa ja lämmönvaihtimissa, koska sillä erittäin hyvä sähkön- ja lämmönjohtavuus. (Sorsa 2015, 36.)

Kupari ei ole reaktiivinen, eli se ei reagoi veden tai useimpien happojen kanssa, mikä tekee siitä korroosiokestävän metallin. Rautaan verrattuna kupari ei ruostu kokonaan vaan ainoastaan pinnalta, jolle muodostunut oksidi- tai karbonaattikerros suojaa sitä syvemmältä korroosiolta. (Sorsa 2015, 36.) Teräksen valmistuksessa kuparia käytetään seosaineena lisäämään korroosiokestävyyttä tietyiltä hapoilta ja stabiloimaan austeniittia. Sitä voidaan hyödyntää myös teräksen muovattavuuden parantamisessa. (Outokumpu.)

## 4.7 Nikkeli

Nikkeli (Ni) on keltaiseen taittava hopeanhohtoinen metalli, jonka tiheys on  $8,9 \text{ g/cm}^3$  ja sulamispiste  $1455 \text{ }^\circ\text{C}$  (Ansaharju ym. 1989, 88). Nikkeliä esiintyy luonnossa sulfidimineraaleissa. Sen korroosiokestävyyden takia sitä käytetään usein metalliesineiden pinnoitteena. Nikkeli sopii hyvin erilaisiin metalliseoksiin, niistä sitä käytetään eniten teräksen ja kuparin seosaineena. (Ansaharju ym. 1989, 88; Sorsa 2015, 30.) Nikkeliä käytetään kromin rinnalla ruostumattomissa teräksissä parantamassa niiden muovattavuuden lisäksi niille muita välttämättömiä ominaisuuksia (Ansaharju ym. 1989, 33).

Seosaineena teräksen valmistuksessa nikkeli yleisesti parantaa sitkeyttä, karkaistavuutta ja venyvyyttä (Outokumpu; Sorsa 2015, 30). Nikkeliä kuitenkin käytetään pääasiassa muodostamaan austeniittia. Se myös vähentää korroosion muodostumista hapettavissa ympäristöissä. Joissakin teräslajeissa sen muodostamia rakenteita käytetään teräksen lujuuden parantamisessa. Martensiittisissa teräksissä, joissa hiilipitoisuutta vähennetään samalla, nikkelin lisäys parantaa teräksen hitsattavuutta. (Outokumpu.)

Rauta ja nikkeli muodostavat korvausliuoksen seostettaessa. Nikkeli stabiloi austeniitin pintakeskisen kuutiohilan alhaisemmille lämpötiloille. Laskeneen muuttumislämpötilan takia nikkeli edesauttaa jäädyttämisen myötä martensiitin muodostumista teräksen rakenteessa. (Mohrbacher & Kern 2023.)

#### 4.8 Molybdeeni

Molybdeeni (Mo) on harmaanvalkoinen metalli, jonka tiheys on 10,2 g/cm<sup>3</sup> ja sulamispiste 2623 °C (Molybdenum; Sorsa 2015, 31). Teräksen valmistuksen yhteydessä molybdeenia voidaan lisätä pieninä määrinä parantamaan kovuutta, vetolujuutta ja korroosionkestävyyttä. Sillä on samanlainen vaikutus teräksen kovuuteen ja vetolujuuteen kuin kromilla, mutta sitä tarvitaan vähemmän. Seosaineen sitä käytetään 0,2–0,5 % pitoisuuksina teräslajin mukaan. (Ansaharju ym. 1989, 34; Sorsa 2015, 31.) Molybdeenin lisäys teräkseen edesauttaa ferriitin muodostumista (Outokumpu).

#### 4.9 Boori

Boori (B) on alkuaine, jota esiintyy luonnossa vain yhdisteinä, boraatteina. Se ei ole luonteeltaan reaktiivinen ja fluoria raskaammat halogeenit vaativat 500–600 °C lämpötilan reagoidakseen boorin kanssa. Korkeissa lämpötiloissa, 600–2000 °C, boori reagoi kaikkien muiden epämetallien paitsi vedyn, germaniumin, telluurin ja jalokaasujen kanssa. Tällöin se myös pelkistää vedestä vetykaasua. Reaktiossa boori muodostaa typen oksidit boorinitridiksi ja hiilimonoksidin hiileksi. (Sorsa 2015, 31.)

Teräksen valmistuksessa booria lisätään parantamaan teräksen karkenevuutta ja kulutuskestävyyttä. Seosaineena sitä tarvitaan hyvin pieniä määriä halutun tuloksen saavuttamiseksi. Booripitoisuus on tällöin 0,0010 % luokkaa. Seosaineena se antaa noin 0,01 % pitoisuudessa saman karkaistavuuden kuin toiset kalliimmat seosaineet, joita tarvitaan suurempia määriä seostamiseen. (Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40; Total Materia 2007.)

#### 4.10 Volframi

Volframi (W) on harmaanvalkoinen metalli, jonka tiheys on 19,3 g/cm<sup>3</sup> ja sulamispiste 3414 °C (Tungsten). Teräksen valmistuksessa sitä lisätään parantamaan kovuutta, kimmoisuutta ja vetolujuutta

(Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40). Volframilla on samantapainen vaikutus teräkseen kuin kromilla. Yhdessä hiilen kanssa volframi muodostaa erittäin kovia karbideja parantaen näin teräksen kovuutta. Volframi seosteiset teräkset ovat niiden parantuneen kovuuden takia myös päästönkestäviä. (Ansaharju ym. 1989, 34.)

#### **4.11 Koboltti**

Koboltti (Co) on harmaanvalkoinen metalli, jonka tiheys on  $8,9 \text{ g/cm}^3$  ja sulamispiste  $1495 \text{ }^\circ\text{C}$ . Luonnossa sitä esiintyy usein nikkelin yhteydessä, ja kumpaakin esiintyy meteoriittiraudassa. Kobolttia käytetään usein korroosion- ja vedenkestävinä seoksina. (Sorsa 2015, 32.) Teräksen valmistuksessa koboltti vaikuttaa samantapaisesti kuin nikkeli (Ansaharju ym. 1989, 34). Sitä käytetään seosaineena etenkin martensiittisissä teräksissä, joissa se parantaa teräksen kovuutta ja päästönkestävyyttä etenkin korkeissa lämpötiloissa (Outokumpu).

#### **4.12 Niobi**

Niobium (Nb) on harmaa metalli, jonka tiheys on  $8,57 \text{ g/cm}^3$  ja sulamispiste  $2477 \text{ }^\circ\text{C}$ . Niobiumista käytetään myös toista nimitystä niobi. (Niobium.) Sen esiintyvyys luonnossa on harvinaista ja sitä käytetään lähinnä seosaineena metalliseoksissa. Teräksen valmistuksessa niobia lisätään parantamaan teräksen lujuutta ja lämmönkestävyyttä. Niobi on mikroseosaine ja pelkästään  $0,1 \%$  pitoisuudella sillä on huomattava vaikutus teräksen lujuuteen. (Sorsa 2015, 33.) Se on vahva ferriitin ja karbidien muodostaja. Tietyissä teräslajeissa sitä lisätään myös estämään raerajoilla syntyvää raerajakorroosiota. (Outokumpu.)

#### **4.13 Vanadiini**

Vanadiini (V) on harmaanvalkoinen metalli, jonka tiheys on  $6,0 \text{ g/cm}^3$  ja sulamispiste  $1910 \text{ }^\circ\text{C}$  (Vanadium). Luonnossa sitä esiintyy yli kuudessakymmenessä mineraalissa ja se on yksi yleisimmistä raskasmetalleista, joita energiantuotanto levittää ympäristöön (Sorsa 2015, 32). Seosaineena vanadiini muodostaa alhaisessa lämpötilassa karbideja ja nitridejä parantaen teräksen kovuutta ja päästönkestävyyttä (Outokumpu). Vanadiini parantaa teräksen lujuutta korkeissa lämpötiloissa huonontamatta sen

sitkeyttä (Ansaharju ym. 1989, 34). Teräksen rakenteessa vanadiini edesauttaa ferriitin muodostumista (Outokumpu). Sen lisäksi vanadiinin lisäys tekee teräksen raekoon pieneksi. Seosaineena vanadiinia lisätään pieniä määriä. (Ansaharju ym. 1989, 34.)

#### **4.14 Titaani**

Titaani (Ti) on harmaanvalkoinen metalli, jonka tiheys on  $4,5 \text{ g/cm}^3$  ja sulamispiste  $1670 \text{ °C}$  (Titanium a; Titanium b). Metallina se on kevyttä ja lähes yhtä lujaa kuin teräs. Sillä on erinomainen korroosiokestävyys. Teräksen valmistuksessa titaania käytetään hapenpoistoon sekä parantamaan korroosio- ja väsymiskestävyyttä. (Sorsa 2015, 34.)

Titaanilla on samantapainen vaikutus teräkseen kuin niobilla ja molemmat ovat mikroseosaineita. Sillä on vahva kyky muodostaa karbideja hiilen kanssa ja estää siten kromikarbidiinien syntymistä. Teräksen rakenteessa se edesauttaa ferriitin muodostumista ja estää raerajakorroosion syntymistä tietyissä teräslajeissa. (Outokumpu; Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40.)

#### **4.15 Rikki**

Rikki (S) on teräksessä esiintyvä haitallinen aine ja sitä esiintyy raudassa malmista asti. Raakaurasta sitä poistetaan lisäämällä kalsiumseoksia tai magnesiumia, jolloin se yhdistymisen myötä nousee kuumaan. (Ansaharju ym. 1989, 23, 34.) Teräksessä rikki muodostaa rautasulfidia ( $\text{FeS}$ ), joka aiheuttaa kuumahauratta (Metallinjalostajat 2014, 5). Kuumahauraus häiritsee teräksen hitsausta ja kuumamuovausta, koska se aiheuttaa teräksen repeilyä (Sorsa 2015, 34). Sen lisäksi rikki heikentää teräksen kylmämuovattavuutta ja iskusitkeyttä (Ansaharju ym. 1989, 34). Rikkipitoisuus teräksissä saa olla enintään 0,05 %, mutta käytännössä se on yleisesti 0,01–0,03 % alueella (Sorsa 2015, 34).

Mangaanin lisäys seostamisen yhteydessä sitoo rikin vähemmän haitalliseen muotoon, mangaanisulfidiksi ( $\text{MnS}$ ), poistaen sen haitalliset vaikutukset (Metallinjalostajat 2014, 5). Mangaanisulfidiskeumat ovat pehmeitä ja ne muodostavat voitelevan kerroksen lastun ja terän väliin. Rikillä on siis parantava vaikutus lastuttavuuteen yhdistettynä mangaaniin. Pienikin pitoisuus valmistuksen yhteydessä voi vaikuttaa merkittävästi teräksen lastuttavuuteen. (Sandvik Coromant.)

#### 4.16 Fosfori

Fosfori (P) on teräksessä esiintyvä haitallinen aine ja sitä esiintyy raudassa malmista asti. Se pyritään poistamaan teräksen valmistuksen yhteydessä. Fosforilla on haitallinen vaikutus teräksen iskutheyteen. (Sorsa 2015, 34.) Sen lisäksi fosfori haurastuttaa terästä kylmänä lisäten lohkomurtumavaaraa. Fosforipitoisuus teräksissä on yleisesti 0,01–0,04 % alueella. Tietyissä teräslajeissa fosforia käytetään rikin kanssa parantamaan murtolastun aikaansaamista. (Ansaharju ym. 1989, 34; Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40.) Teräksen rakenteessa fosfori edesauttaa ferriitin muodostumista (Davis 1998, 156).

#### 4.17 Typpi

Typpi (N) on teräksessä esiintyvä haitallinen aine ja sitä jää teräkseen valmistuksen yhteydessä. Ferriittiin liuenneena typpiatomit haurastuttavat terästä ajan myötä eli ne aiheuttavat vanhenemisherkkyttä. Typpi pyritään poistamaan sitomalla se valmistuksen yhteydessä vähemmän haitalliseen muotoon. Typpipitoisuus muovattavissa teräksissä tulee olla noin 0,01 % ja hitsattavissa teräksissä alle sen. (Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40; Sorsa 2015, 34.) Typellä on myös hyviä vaikutuksia teräkseen. Typpi edesauttaa austeniitin muodostumista, siten parantaen teräksen lujuutta. Molybdeenin yhdistettynä typpi voi parantaa teräksen korroosionkestävyyttä. (Outokumpu.)

#### 4.18 Happi

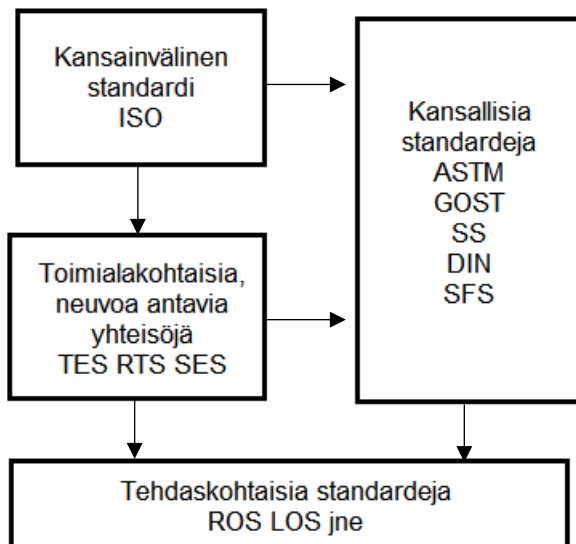
Happi (O) on teräksessä esiintyvä haitallinen aine ja sitä jää teräkseen valmistuksen yhteydessä (Rakennusopin laboratorio & Väisänen 2007, 40). Happi muodostaa teräksessä sen ominaisuuksille haitallisia sulkeumia, joista erityisen haitallisia ovat sen muodostamat oksidisulkeumat. Ne aiheuttavat teräksessä ajan myötä väsymislujutta. Teräs on käsittelyjen ja seostuksen myötä tiivistetty, jos siinä on tarpeeksi happea sitovia aineita, jolloin teräksen jähmettymisen aikana ei synny kaasunkaloita. Happenpoistoon eli tiivistykseen seosaineina käytetään yleensä piitä tai alumiinia. (Metallinjalostajat 2014, 5, 45.)



## 5 TERÄKSEN STANDARDOINTI

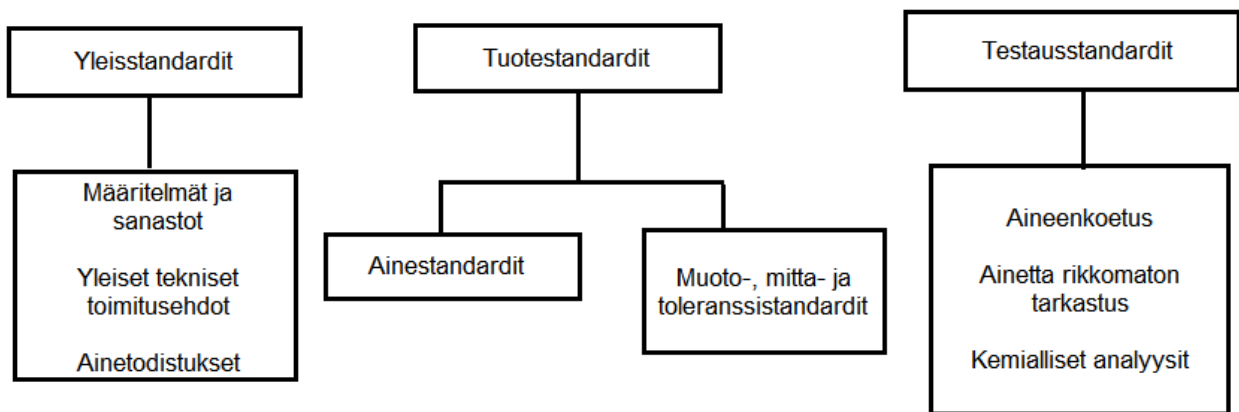
Olemassa olevien teräslajien määrän takia useimmat niistä on standardisoitu, eli niiden koostumuksesta ja ominaisuuksista on laadittu ja vahvistettu standardi. Tällöin teräksen valmistaja ja käyttäjä tietävät aina, mistä teräksestä on kyse ja millaiset sen ominaisuudet ovat, kun viitataan tiettyyn terässtandardiin. (Metallinjalostajat 2014, 8.) Teräslajin ominaisuusprofiilin määrittelevät sen sisältämät seosaineet ja miten se on valmistuksen yhteydessä lämpökäsitelty (Outokumpu).

Kansalliset standardit, Suomessa SFS-standardit, on korvattu 1990-luvulta lähtien eurooppalaisilla EN-standardeilla, joihin Suomi on sitoutunut. Ne laatii Euroopan standardisointijärjestö CEN, jonka jäseniä ovat kaikki EU-maat sekä muutama muu, kuten Norja. CEN standardisointijärjestön lisäksi kansainvälinen standardoimisjärjestö ISO laatii suositusstandardeja, joiden pohjalta kansalliset standardoimisjärjestöt laativat omat standardinsa. (Ansaharju ym. 1989, 8; Metallinjalostajat 2014, 8.) Kuvassa 20 on esitetty ainestandardoinnin järjestelmä.



KUVA 20. Ainestandardoinnin järjestelmä (mukaiillen Ansaharju ym. 1989, 8)

Terässtandardit on tarkoitettu avuksi teräksen käyttäjille suunnittelussa, hankinnassa, valmistuksessa sekä laadun suunnittelussa, varmistuksessa ja tarkastuksessa. Ne toimivat yhteisenä kielenä eri valmistajien, käyttäjien ja valvovien viranomaisten välillä. Terässtandardeja on eri tyyppisiä, niistä keskeisiä ovat ainestandardit. Tarkastuksella ja testauksella on omat standardinsa. Ainestandardilla tarkoitetaan terästuotteen teknisiä vaatimuksia, joita muun muassa ovat sen kemiallinen koostumus, mekaaniset ominaisuudet ja testaus. Ainestandardit on ryhmitelty teräslajien mukaan, kuten seostamattomat hitsattavat rakenneteräkset, ruostumattomat teräkset ja nuorrutusteräkset. Ainestandardeissa viitataan muihin standardeihin. (METSTA 2019, 4, 7.) Kuvassa 21 on esitetty teräkseen liittyviä standardeja.



KUVA 21. Standardeja (mukaiillen METSTA 2019, 7)

Yhtenä periaatteena terässtandardeissa esitetyille vaatimuksille on, että ne on pystyttävä varmentaa eli on standardisoitu menetelmä testata tai tarkastaa vaadittu ominaisuus. On hyvin olennaista, että näytteenotossa, koekappaleiden valmistuksessa ja kokeissa käytetään kaikkialla samoja menetelmiä. Siksi tarkastuksessa ja testauksessa pyritään käyttämään kansainvälisiä standardeja. Terästuotteiden muodoissa, lajeissa ja käyttötarkoituksissa on valtavia eroja. Tämän takia ainestandardeissa tavallisesti esitetään vaatimuksia testauksen laajuudesta ja koekappaleiden sijainnista terästuotteessa. (METSTA 2019, 10.)

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä käytiin läpi keskeisimmät aihealueet teräksen seosaineiden merkityksen kannalta. Alussa esitettiin yleistä teoriaa teräksestä, teräksen rakenteesta ja valmistuksesta. Tämän jälkeen esitettiin materiaalin valintaan ja ominaisuuksiin liittyvää teoriaa. Teorian esittäminen on tärkeää seosaineiden käytön tarpeellisuuden ymmärtämiseksi eri tilanteissa. Tekstin pohjana käytetyistä kirjallisuuslähteistä osa on yli kaksikymmentä vuotta vanhoja. Ne ovat kuitenkin edelleen ajankohtaisia, koska yleisellä tasolla teoriassa ei ole tapahtunut suuria muutoksia. Tämä kävi lähteiden etsinnän aikana selville. Yritysten ja yhdistysten sivuilta löydettyä tietoa käytettiin pääosin tukemaan tekstin päälähteiden tietoa.

Opinnäytetyössä kävi ilmi, että teräs on moninainen materiaali ja teräslajeja on olemassa tuhansia. Seostuksessa sekoitetaan kahta tai useampaa ainetta keskenään, jolloin tarkoituksena on luoda materiaali tietyillä ominaisuuksilla. Seosaineiden käytöllä teräksen valmistuksessa vaikutetaan teräksen ominaisuuksiin joko suoraan tai muutetaan sen mikrorakennetta. Käytetyillä seosaineilla ja niiden pitoisuuksilla saadaan aikaan erilaisia lopputuloksia. Tämän takia on tärkeää ymmärtää teräksen rakenteen koostumus ja se, miten eri seosaineet yhdessä vaikuttavat siihen. Hiili on teräksen valmistuksessa tärkein seosaine, koska se vaikuttaa eniten teräksen lopullisiin ominaisuuksiin ja mikrorakenteeseen. Rauta-hiili-tasapainopiirroksista voidaan päätellä, millaiseksi valmistettavan teräksen mikrorakenne muodostuu. Seosaineiden lisäyksellä pyritään pääasiassa ohjaamaan muodostuvia mikrorakenteita. Tietyt seosaineet stabiloivat joko ferriitin tai austeniitin muodostumista. Muuttamalla seoksen hiilipitoisuutta ja lämpötilaa saadaan muodostettua sementiittiä, perliittiä ja martensiittia. Jokaisella mikrorakenteella ja niiden yhdistelmillä on erilaiset ominaisuudet.

Opinnäytetyö eteni odotusten mukaisesti ja aiheen rajauksen myötä tekstin rakenne koki vain muutamia lisäyksiä syvemmän perehdytyksen jälkeen. Tiedonhakuprosessissa yleinen teoria oli helposti löydettävissä ja löydetty lähteet olivat yhdenmukaisia. Seosaineista löydetty tieto oli hyvin vähäistä ja niiden vaikutuksesta teräkseen ei löytynyt juurikaan tietoa. Tämä voi johtua siitä, että yhdessä ne vaikuttavat eri pitoisuuksilla ja erilaisten aineiden vaikutuksesta eri tavalla teräksen ominaisuuksiin. Mielestäni seosaineista sekä teräksestä annettiin hyvä kokonaiskuva ja saavutettiin opinnäytetyön tavoitteen.

## LÄHTEET

Aluminium. Royal Society of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/13/aluminium>. Viitattu: 29.3.2023.

Ansaharju T., Ilomäki O., Katainen H., Maaranen K. & Mäkinen A. 1989. Materiaalitekniikka. 2., painos. Porvoo: WSOY.

Bhadeshia, H. & Honeycomb, R. 2017. Steels: Microstructure and Properties. 4., painos. Boston, MA: Elsevier. Saatavilla: [https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=4Rt5CgAAQ-BAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=steel+microstructure+properties&ots=gFXErZKoUH&sig=fRh-podQ1yOdsUF88VE4C5EQ0f5o&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=4Rt5CgAAQ-BAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=steel+microstructure+properties&ots=gFXErZKoUH&sig=fRh-podQ1yOdsUF88VE4C5EQ0f5o&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false). Viitattu: 28.3.2023.

Chromium. Royal Society of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/24/chromium>. Viitattu: 29.3.2023.

Copper. Royal Society of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/29/copper>. Viitattu: 29.3.2023.

Davis, J.R. 1998. Metals Handbook. Desk Edition. 2., painos. ASM International. Saatavilla: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.9781627081993>. Viitattu: 28.3.2023.

Hebda M., Dębecka, H. & Kazior, J. 2015. Influence of silicon addition on the mechanical properties and corrosion resistance of low-alloy steel. *Bulletin of Materials Science* 38(7), 1687–1692. Saatavissa: <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/boms/038/07/1687-1692>. Viitattu: 27.3.2023.

HYBRIT®. Uusi vallankumouksellinen teräksenvalmistuksen teknologia. SSAB. Saatavilla: <https://www.ssab.com/fi-fi/fossiilivapaa/hybrit-a-new-revolutionary-steelmaking-technology>. Viitattu 27.3.2023.

Jokinen, V. 2019. Materiaalitieteen perusteet luento 3: Mekaaniset ominaisuudet. Aalto-yliopisto. Saatavissa: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1116571/mod\\_resource/content/2/3%20Mekaaniset%20ominaisuudet%20v2.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1116571/mod_resource/content/2/3%20Mekaaniset%20ominaisuudet%20v2.pdf). Viitattu: 27.3.2023.

Lassila, M. 2016. Aineenkoetuskoneen käytön kehittäminen opetus- ja tutkimuskäyttöön. Opinnäytetyö. Centria-ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2016061513040>. Viitattu 11.4.2023.

Manganese. Encyclopedia Britannica. Saatavilla: <https://www.britannica.com/science/manganese>. Viitattu: 27.3.2023.

Metallinjalostajat. 2014. Teräskirja. 9. uudistettu painos. Helsinki: Metallinjalostajat. Saatavilla: [https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/teraskirja\\_flip/mobile/index.html](https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/teraskirja_flip/mobile/index.html).

METSTA 2019. Terässtandardit. Saatavissa: [https://metsta.fi/wp-content/uploads/2020/05/Terasstandardit\\_2019.pdf](https://metsta.fi/wp-content/uploads/2020/05/Terasstandardit_2019.pdf). Viitattu 29.3.2023.

Mohrbacher, H. & Kern, A. 2023. Nickel Alloying in Carbon Steel: Fundamentals and Applications. Alloys 2, 1–28. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/alloys2010001>. Viitattu: 27.3.2023.

Molybdenum. Royal Society of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/42/molybdenum>. Viitattu: 29.3.2023.

Niobium. Royal Society of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/41/niobium>. Viitattu: 29.3.2023.

Outokumpu. The effects of alloying elements. Saatavilla: <https://www.outokumpu.com/fi-fi/expertise/stainless-basics/the-effects-of-alloying-elements>. Viitattu: 27.3.2023.

Rakennusopin laboratorio & Väisänen, P. 2007. Teräs: Perustietoa arkkitehtiopiskelijalle. Espoo: TKK, arkkitehtiosasto, rakennusoppi. Saatavilla: [https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/40/66e53a5/Teras\\_web.pdf](https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/40/66e53a5/Teras_web.pdf).

Sandvik Coromant. Lastuttavat materiaalit. Saatavissa: <https://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge/materials/workpiece-materials>. Viitattu: 27.3.2023.

Silicon. Encyclopedia Britannica. Saatavissa: <https://www.britannica.com/science/silicon>. Viitattu 27.3.2023.

Sipola, T. 2021. Maailman ensimmäinen erä fossiilivapaata terästä on valmiina – uusi teknologia vähentää pian Suomen hiilidioksidipäästöjä seitsemän prosenttia. YLE 18.8.2021. Saatavissa: <https://yle.fi/a/3-12062634>. Viitattu: 27.3.2023.

Sorsa J. 2015. Materiaalitekniikka. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

Teräs. Teräsrakenneyhdistys. Saatavilla: <https://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/teras/>. Viitattu 23.2.2023.

Teräs materiaalina. Teräsrakenneyhdistys. Saatavilla: <https://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/teras/teras-materiaalina/>. Viitattu: 23.2.2023.

Terästä ja rautaa. Teräsrakenneyhdistys. Saatavilla: <https://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/teras/teras-materiaalina/terasta-ja-rautaa/>. Viitattu 23.2.2023.

Teräksen kierrätys. Teräsrakenneyhdistys. Saatavilla: <https://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/teras/co2-ja-kiertotalous/teraksen-kierratys/>. Viitattu 24.2.2023.

Titanium a. Encyclopedia Britannica. Saatavissa: <https://www.britannica.com/science/titanium>. Viitattu 29.3.2023.

Titanium b. Royal Society of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/22/titanium>. Viitattu: 29.3.2023.

Total Materia 2007. Boron in Steel: Part Two. Saatavissa: <https://www.total-materia.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=214>. Viitattu: 29.3.2023.

Tungsten. Royal Society of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/74/tungsten>. Viitattu: 29.3.2023.

UKK. Vastaukset keskeisiin kysymyksiin. SSAB. Saatavilla: <https://www.ssab.com/fi-fi/fossiilivapaa/faqs-the-big-questions-answered>. Viitattu: 27.3.2023.

Vanadium. Royal Society of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/23/vanadium>. Viitattu: 29.3.2023.